ZEITSCHRIFT FÜR BAUWESEN

(INGENIEURBAUTEIL)

HERAUSGEGEBEN

IM

PREUSSISCHEN FINANZMINISTERIUM

SCHRIFTLEITER:

RICHARD BERGIUS UND Dr.-Ing. **NONN**

---

75. JAHRGANG 1925

MIT ZEHN EINLEGETAFELN UND ZAHLREICHEN TEXTABBILDUNGEN



BERLIN 1925

VERLAG VON GUIDO HACKEBEIL A.-G.

Inhalt des fünfundsiebzigsten Jahrganges

Ingenieurbauteil.

Seite

Die Grundwasserbewegung im Grunewald bei Berlin, mit 11 Textabbildungen und 2 Tafeln, vom Professor Dr. W. Koehne, Berlin, Mitglied der Landesanstalt für Gewässerkunde im Ministerium für Landwirtschaft, Domänen und Forsten 1

Schienenkopf und Radreifen. Kräftewirkungen und Gestaltung des Querschnittes, mit 45 Textabbildungen, vom Ingenieur Dr. R. Hanker in Wien 19

Grundwasserkundliche Forschungen in Nordamerika, von Oscar, Edward Meinzer (Buchbesprechung) 32

Das Nidderkraftwerk bei Lißberg in Oberhessen, mit 16 Textabbildungen und 2 Tafeln, vom Regierungsbaurat Lorenz in Friedburg (Hessen) 33

Neubau der 3. Schleuse Münster i. W., mit 23 Textabbildungen, vom Regierungsbaurat Struckmann in Münster i. W. 42

Beitrag zur Bestimmung der Regenflutwelle in großstädtischen Sielnetzen, mit 43 Textabbildungen, vom Dr.-Ing. Otto Schoenefeldt in Berlin 52

Der Bruch der Gleno-Talsperre nach dem amtlichen und anderen Gutachten, mit 18 Abbildungen im Text und auf 2 Tafeln, vom Professor Dr.-Ing. Adolf Ludin in Charlottenburg 65

Die Arbeiten zur Entwässerung des Stadtgebietes von Batavia im letzten Jahrzehnt, mit 24 Abbildungen im Text und auf 2 Tafeln, vom Regierungsbaurat Karl Daub in Düsseldorf 76

Ueber die Knickung gerader Stäbe durch ihr Eigengewicht, mit 7 Textabbildungen, vom Dr.-Ing. Karas in Brünn 86

Die Diemeltalsperre, mit 15 Textabbildungen und 2 Tafeln, vom Regierungs- und Baurat Paul Gerecke in Magdeburg 92

Die Entwicklung des amerikanischen Straßenbauwesens, mit 5 Textabbildungen, vom Regierungsbaumeister Dr.-Ing. und Dr. rer. pol. Haller in Stuttgart 104

Die Anlagen und Einrichtungen zur Verhütung von Stauschäden im Gebiete der Waldecker Talsperre, mit 14 Textabbildungen und einem Lageplan, vom Professor Dr.-Ing. Thürnau in Darmstadt 113

Druck: Guido Hackebeil A.-G., Berlin S 14, Stallschreiberstr. 34 35

Die Grundwasserbewegung im Grunewald bei Berlin.

Vom Professor Dr. **W. Koehne,** Berlin.
Mitglied der Landesanstalt für Gewässerkunde im Ministerium für Landwirtschaft, Domänen und Forsten.

(Hierzu 2 Tafeln.)

I. Einleitung.

Die außerordentlich rasche Zunahme, die der Wasserverbrauch von Groß-Berlin lange Zeit hindurch von Jahr zu Jahr zeigte, hatte zu der Notwendigkeit geführt, in bedeutendem Umfange Grundwasseruntersuchungen in der Umgebung der Reichshauptstadt vorzunehmen. Es wäre eine dankbare Aufgabe gewesen, unter Zusammenfassung zahlreicher Einzeluntersuchungen den an diesen Fragen technisch und wissenschaftlich interessierten Kreisen eine erschöpfende Veröffentlichung über die Grundwasserverhältnisse bei Groß-Berlin zu bieten. Leider macht es aber heute die allgemeine Lage unmöglich, derartig umfangreiche Abhandlungen mit Zahlentafeln und Zeichnungen herauszugeben. Die vorliegende Veröffentlichung mußte sich daher auf ein besonders wichtiges und lehrreiches Gebiet, den Grunewald, beschränken und kann auch hier nur einen Auszug aus den in der Landesanstalt für Gewässerkunde bearbeiteten Unterlagen bieten.

In der Geschichte der Erforschung der Grundwasserverhältnisse bei Groß-Berlin nimmt der Grunewald eine der ersten Stellen ein. Bietet doch der Waldrand am Ufer der Havel eine besonders günstige Gelegenheit, große Wassermassen aus dem Untergrunde zutage zu fördern. Demgemäß wird ein großes Wasserwerk bei Beelitzhof seit langer Zeit betrieben, während ein kleineres am Teufelssee mitten im Walde voraussichtlich in absehbarer Zeit stillgelegt wird (Tafel 1).

Die Dürre des Jahres 1911 lenkte in besonderem Maße die Aufmerksamkeit weiter Kreise auf die Grundwasserfragen, und zwar sprang die teilweise Austrocknung der Grunewaldseen besonders in die Augen. In den im Jahre 1910 herausgegebenen Erläuterungen zur geologischen Karte 1 : 25 000, Blatt Teltow, sind diese Erscheinungen noch nicht erwähnt. Aber bald darauf hatte sich deren Verfasser, K e i l h a c k, mit der Absenkung der Seespiegel zu befassen und erstattete darüber ein Gutachten (13).*) Er kam zu dem Ergebnis, daß die Brunnenreihen bei Beelitzhof, obwohl sie ihr Grundwasser aus tieferen Schichten entnehmen, doch auch den oberen Grundwasserspiegel absenken müßten. Dieses obere Grundwasser stehe in Verbindung mit dem Wasser des Schlachtensees, so daß der Seespiegel mit dem Grundwasserspiegel herabgehen müsse. Er machte den Vorschlag, schleunigst Grundwasserstandsbeobachtungen einzurichten. Den zuerst von ihm erwogenen Gedanken, die gefährdeten Seen an die Spreehaltung des Teltowkanals anzuschließen, verwarf er als zu kostspielig. Dagegen trat er dafür ein, den Schlachtensee und die Krumme Lanke durch einen Kanal mit der Havel zu verbinden und soweit auszubaggern, daß keine Schlammbänke aus dem gesenkten Seespiegel herausragen könnten. Gegen diesen Vorschlag erhob W a h n s c h a f f e Einspruch, da dadurch der Wasserspiegel noch weiter gesenkt worden wäre; er hielt eine Einschränkung des Betriebes in Beelitzhof für erforderlich.

Das Ministerium für Landwirtschaft, Domänen und Forsten bevorzugte aber einen anderen Weg, den es im Dezember 1912 bekanntgab, nämlich die Spiegel des Schlachtensees und der Krummen Lanke durch Ueberpumpen von Havelwasser zu heben. Es wurde vereinbart, daß der Spiegel beider Seen auf 31,60 m über N.N. gehalten werden sollte, obwohl im Naturzustande der Spiegel der Krummen Lanke höher gelegen war als derjenige des Schlachtensees. Von der Hebung der beiden Seespiegel erwartete man auch eine günstige Wirkung auf die Wasserstände in deren Nachbarschaft. Demgemäß wurde im Frühjahr 1913 mit der Einleitung von Havelwasser in beide Seen begonnen.

Inzwischen hatte sich ein Schutzverband für die Grunewaldseen gebildet, der sich mit dieser Maßnahme nicht ohne weiteres zufrieden geben wollte, da er fürchtete, daß die vereinbarte Hebung des Spiegels des Schlachtensees nicht auch eine allgemeine Hebung des Grundwasserstandes an der Seenkette des Grunewalds zur Folge haben würde. Daher erstrebte er zunächst eine wissenschaftliche Untersuchung durch eine unparteiische Stelle. Im Jahre 1914 ließ er Bohrungen unter Leitung der geologischen Landesanstalt ausführen, die die Bohrproben untersuchte. In die Bohrlöcher wurden Rohre zur Beobachtung des Grundwasserstandes eingesetzt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen veranlaßten K e i l h a c k, seinen früheren Standpunkt wesentlich zu ändern (21). Er wies darauf hin, daß der Grundwasserspiegel stellenweise tiefer angetroffen worden sei als der Spiegel der benachbarten offenen Gewässer. Er schloß daraus, daß deren Wandungen vollkommen dicht sein müßten und kein Wasser in den Untergrund abfließen ließen; daraus gehe hervor, daß den Seen nur soviel Wasser zugeführt werden müsse, um sie auf einer bestimmten Höhe zu erhalten, wie ihnen durch Verdunstung verloren gehe.

Die Frage, ob die Wandungen der Märkischen Gewässer undurchlässig sind oder nicht, hatte inzwischen auch aus anderen Gründen eine große Bedeutung für die Wasserbauverwaltung gewonnen. Infolgedessen nahm nun K e l l e r eine gründliche Prüfung der Verhältnisse beim Schlachtensee in Angriff. Er stellte fest (22), wieviel Wasser tatsächlich dem Schlachtensee und der Krummen Lanke durch die Rohrleitung aus der Havel und durch die Niederschläge zugeführt worden und wieviel davon verdunstet ist. Es zeigte sich nun, daß nur ein kleiner Teil des Wassers verdunstet, eine sehr viel größere Menge, nämlich rd. 2 Millionen cbm jährlich, aber in den Untergrund übergeht und als Grundwasser weiterfließt.

Dies lehrreiche Ergebnis ließ es wünschenswert erscheinen, die Grundwasserverhältnisse im Grunewald weiterhin zu verfolgen. Es wäre bedauerlich gewesen, wenn die vom Schutzverband gesetzten Rohre zu diesem Zwecke nicht benutzt worden wären. Die für die regelmäßige Durchführung von Beobachtungen erforderlichen Mittel wurden von den Ministern für Landwirtschaft, Domänen und Forsten und der öffentlichen Arbeiten zur Verfügung gestellt und die Landesanstalt für Gewässerkunde mit der Durchführung der Arbeiten beauftragt. Kurze Mitteilungen über die Ergebnisse dieser Untersuchungen gelangten an die Oeffentlichkeit durch einen im Auftrage des Landwirtschaftsministers in der Versammlung der deutschen Landwirtschaftsgesellschaft in Magdeburg gehaltenen Vortrag (29).

Den Beobachtern, Hegemeister F r i c k e und später Förster M e i s t e r in Eichkamp, Hegemeister W o l f f und später Förster S c h r ö d e r in Wannsee, Förster H e r r m a n n in Dachsberg, Förster I l g n e r in Teufelssee, Landwirt P f e n n i g in Nikolassee und dem städtischen Tiefbauamt Berlin-Grunewald gebührt Dank für die sorgfältige und ausdauernde Durchführung der Beobachtungen, die die vorliegende Arbeit erst ermöglicht hat. Auch das städtische Tiefbauamt in Berlin-Zehlendorf hat in dankenswerter Weise der Landesanstalt für Gewässerkunde Grundwasserbeobachtungen aus Zehlendorf und Dahlem, sowie Pegelbeobachtungen im Schlachtensee und der Krummen Lanke mitgeteilt.

Die Messungen des Grundwasserstandes im Grunewald sind zweimal im Monat ausgeführt worden, da dies für die Beobachtungsstellen mit tieferliegendem Grundwasserstande, die weitaus überwiegen, völlig genügte und häufigere Beobachtungen zu große Kosten verursacht hätten. Aufgabe der vorliegenden Arbeit ist es, die Ergebnisse dieser 1917 bis 1923 durchgeführten Beobachtungen darzustellen und zu erläutern.

II. Die Beschaffenheit des Geländes.

Den natürlichen Vorfluter fast des ganzen untersuchten Geländes bildet die Havel zwischen Spandau und Wannsee. Oestlich dieses Flusses erstreckt sich zunächst ein Sandgebiet bis zu einer Linie, die über Schmargendorf, Zehlendorf und Stahnsdorf verläuft. Weiter östlich folgt ein Lehmgebiet, das aber auch vielfach mit sandigen Stellen durchsetzt ist.

Das Gelände ist im allgemeinen flach bei einer mittleren Höhe von rd. N. N. + 55 m. Nur zwischen der Havel und der Linie Teufelssee, Barssee, Große Steinlanke (Tafel 1) ist es stark wellig, bei einer mittleren Höhe von etwa N. N. + 60 m, während einzelne Erhebungen eine bedeutendere Höhe erreichen (Karlsberg 78,8 m, Havelberg 96,9 m über N. N.). Auch in der Gegend der Schießstände bei Dahlem ist das Gelände stärker bewegt.

Ein Talzug erstreckt sich über den Halensee, Hundekehlensee, Grunewaldsee, Riemeistersee, Krumme Lanke, Schlachtensee und die Rehwiese. Die Sohlenlinie dieses Talzuges hat kein gleichmäßiges Gefälle, sondern steigt auf und ab. Sie liegt im wesentlichen noch

*) Siehe Schrifttum Seite 18.

so da, wie sie die Eiszeit hinterlassen hat. Zur Ausbildung einer gleichmäßigen Talsohle in jüngerer Zeit ist es nicht gekommen. Der Abfluß erfolgt unterirdisch. Die Linie, die man nach der Geländeneigung als oberirdische Wasserscheide annehmen würde, hat tatsächlich keine Bedeutung.

Etwa in gleicher Richtung wie die Seenkette des Grunewaldes verläuft das Bäketal, das bis zum Bau des Teltowkanals von einem Bache ständig durchflossen wurde.

Zur Kenntnis des Aufbaues des tieferen Untergrundes sind 52 Bohrungen in den Erläuterungen zu Blatt Teltow veröffentlicht. Weitere Bohrergebnisse hatte Kaunhowen (8) mitgeteilt. Ferner sind die Ergebnisse der auf Kosten des Schutzverbandes ausgeführten Bohrungen der Landesanstalt für Gewässerkunde von der Geologischen Landesanstalt mitgeteilt worden. Einige weitere Bohrergebnisse haben die Charlottenburger Wasserwerke der Landesanstalt für Gewässerkunde bekanntgegeben. In der Hauptsache sind diese Bohrungen im Diluvium steckengeblieben.

Aufschluß über den tieferen Untergrund gibt eine Bohrung beim Soolbad Groß-Lichterfelde. Sie hat in 166 m Tiefe die Oberfläche des Septarientones angetroffen, der als mächtige undurchlässige Schicht das Grundwasser der Berliner Gegend in ein unteres salziges und ein oberes süßes Stockwerk trennt. Ueber dem Septarienton liegen miocäne Sande mit Einlagerungen von Kohlenletten.

Die unterste Schicht des Diluviums fand man in einer Tiefe von 53,5 bis 65 m unter Gelände in Gestalt eines sandigen Kieses vorwiegend südlicher Herkunft aber mit nordischen Beimengungen. Diese Schicht, der in anderen Bohrungen auch Geschiebemergel und Tonmergel entsprach, wurde von K e i l h a c k (Erläuterungen zu Blatt Teltow S. 11) der drittletzten oder Elster-Eiszeit zugeteilt.

Ueber diesen meist durchlässigen Ablagerungen folgen die Schichten der vorletzten Interglazialzeit, die meist t o n i g sind. Sie trennen das Süßwasserstockwerk in eine obere und eine untere Abteilung. Die obere Abteilung (Tafel 2) reicht ungefähr bis N. N. + 0 hinab, sie wird teils der Saaleeiszeit, teils der Weichseleiszeit zugerechnet und besteht überwiegend aus Sand, der stellenweise in kiesigen Sand und Kies übergeht; sie bietet daher dem Grundwasser die Gelegenheit zur Fortbewegung. Mitten in diesem Sande sind stellenweise Fetzen von Geschiebemergel eingelagert, die mitunter gerade vom Grundwasserspiegel geschnitten werden. Man trifft daher unter Umständen nach Durchbohrung eines solchen Lehmfetzens gespanntes Grundwasser an, dessen Auftrieb aber so unbedeutend ist, daß die Bezeichnung als artesisches Wasser nicht angebracht erscheint.

Bei den auf Kosten des Schutzverbandes zum Setzen der Beobachtungsrohre ausgeführten Bohrungen (Tafel 1) ist eine schwerdurchlassende Schicht (Geschiebemergel, Lehm oder Ton) an folgenden Punkten angetroffen worden:

Bohrpunkt		von		bis		
Bohrpunkt	1	von	11,00	bis	17,0	m unter Gelände [1])
„	5	„	15,85	„	21,9	„ „ „ [1])
„	7	„	18	„	18,3	„ „ „ [4]
„	10	„	25	„	25,4	„ „ „ [4])
„	14	„	20,4	„	21,2	„ „ „ [4])
„	18	„	22	„	23,45	„ „ „ [3])
„	21	„	8,5	„	?	„ „ „ [4])
„	22	„	2,8	„	6,1	„ „ „ [1])
„	23	„	2,1	„	6,2	„ „ „ [1])
„	24	„	12,75	„	?	„ „ „ [4])
„	25	„	20 55	„	21,9	„ „ „ [2])
„	28	„	0,8	„	1,7	„ „ „ [3])
„	34	„	1 0	„	1,6	„ „ „ [2])
„	36	„	2,0	„	5,0	„ „ „
		und	7,0	„	8,0	„ „ „
„	40	von	0	„	2,0	„ „ „ [3])

Die beiden Rohre 2 und 15 durchsanken zuerst Torf von geringer Mächtigkeit und dann Sand. Bei Rohr 2 sind die humosen Schichten (Torf 1,70 m, grauer Faulschlammsand 0,30 m) zusammen 2 m mächtig, sie tauchen bei tieferer Absenkung des Grundwasserspiegels (z. B. während des ganzen Abflußjahres 1918) ganz aus dem Grundwasser auf, so daß der Torf dann nicht mehr von unten her Wasser aufsaugt. Bei Rohr 15 dagegen ist die Steighöhe des Wassers so erheblich, daß der untere Teil des Torfes stets durchtränkt sein muß.

Bloß Sand und Kies angetroffen haben, abgesehen von einigen Schluffsandbänkchen, die Bohrungen 3, 4, 6, 8, 9, 11, 12, 13, 16, 17, 19, 20, 26, 27, 29, 30, 31, 32, 33, 35, 37, 38, 39, 41, 42, 43.

Auf dem Wasserwerksgelände am Teufelssee hatte man in früherer Zeit Kesselbrunnen errichtet, auf deren Sohle man später Tiefbrunnen gebohrt hat bis hinab auf N. N. + 8 bis N. N. — 7,50 m. Die Aufzeichnungen über diese Bohrungen lassen erkennen, daß hier die schwer durchlassenden Einlagerungen nur als unregelmäßig verteilte Fetzen in den Sand- und Kiesablagerungen eingebettet sind.

Nach P e n c k (32) deutet der Name Grunewald an, daß früher Laubwald herrschte, der am Schlusse des 17. Jahrhunderts den Kiefern wich. Jetzt ist der Grunewald großenteils von älteren Kiefernbeständen eingenommen, in denen sich ein Absterben der Stämme in ausgedehntem Maße bemerkbar macht. Infolgedessen hat man in neuerer Zeit im Walde viele kleinere Bestände von Laubholz verteilt, mit denen man gute Erfahrungen gemacht hat.

Das anschließende, jetzt zu Groß-Berlin gehörende Gelände, das in früheren Jahrzehnten dem Ackerbau diente, ist zum Teil noch unbebaut, zum Teil auch besiedelt, wobei aber größere Gartenflächen zwischen den Gebäuden verblieben sind. Von großer Wichtigkeit für die Grundwasserstände ist die Art der Abwässerbeseitigung. Das durch die Wasserleitung den Häusern zugeführte Gebrauchswasser wird durchweg durch die Kanalisation fortgeführt. Vom Niederschlagswasser verbleibt aber ein beträchtlicher Teil im Gebiet und dient zur Speisung des Grundwassers. So werden dem Hundekehlensee erhebliche Mengen von den Straßen usw. abfließenden Wassers zugeführt. Die Tagewasser aus dem Stadtbezirk Berlin-Grunewald gelangen in den Hundekehlensee, Hubertus-, Hertha-, Königs-, Diana- und Halensee. Auch in Dahlem werden kesselartige Senken zur Aufnahme der Niederschlagswasser benutzt, die hier teils versickern, teils verdunsten.

In Zehlendorf wird ein Teil der Niederschlagswasser im Waldsee zur Versickerung gebracht und kommt so dem Grundwasser zugute; ein anderer Teil wird durch ein Rohr an der Stadtgrenze südlich von der Potsdamer Stammbahn in den Buschgraben geleitet und fließt dem Teltowkanal zu. Ein dritter Teil wird dem zwischen der Wannseebahn und der Potsdamer Stammbahn ein Niederungsmoor durchschneidenden Wiesengraben zugeführt, hier zu einem kleinen Teil vom Grundwasser aufgenommen, zum größeren Teil durch den Buschgraben in den Teltowkanal weitergeleitet.

Es liegt nicht im Rahmen der vorliegenden Arbeit, den Einfluß der Abwässerbeseitigung auf die Grundwasserstände in den westlichen Vororten im einzelnen zu untersuchen, sondern es soll nur auf die Bedeutung dieser Dinge im allgemeinen hingewiesen werden.

Von großem Einfluß auf die Wasserstände im Grunewald sind die drei Wasserwerke. Beim Werk Teufelssee sind die Brunnenanlagen auf kleinem Raum vereinigt. In seiner Umgebung hat der Schutzverband für die Grunewaldseen eine Anzahl von Beobachtungsrohren gesetzt. Bei Beelitzhof zieht sich eine lange Brunnenreihe am Havelufer über das Freibad hinweg hin bei Jagen 100, einige Brunnen liegen auch weiter landeinwärts bei Nikolassee.

Das neuere Wasserwerk Tiefwerder liegt am Nordrande des auf Tafel 1 dargestellten Gebietes. Grundwasserbeobachtungsrohre hat der Schutzverband für die Grunewaldseen in seiner Nähe nicht angelegt und es soll daher im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht weiter behandelt werden.

Die Wassertiefen in den Seen und der Havel unter dem zur Zeit der Messung gerade vorhandenen Wasserspiegel sind in der geologischen Karte (Blatt Teltow 1 : 25 000) angegeben.

Der Hundekehlensee besitzt eine Tiefe von über 4 m, er ist am Süd- und Ostufer von einem Torfsaum umgeben, während er am Westufer an den diluvialen Sand grenzt. Der sandige Boden reicht aber nur 5 bis 10 m weit in den See hinein und wird dann von einer Faulschlammschicht überlagert, die bis zu rd. 11 m Dicke erreicht. Eine kleine diluviale Schwelle trennt dies Torfmoor von dem Hochmoor des Jagen 20, das gegen 10 m dick ist. Nach Süden schließt sich der Grunewaldsee an, dessen starke Auskleidung mit Faulschlamm und Faulschlammkalk bis zu rd. 16 m unter dem Wasserspiegel reicht. Nur eine schmale Sandschwelle trennt ihn von dem großen Hochmoor südlich Paulsborn. In der gleichen langgestreckten Senke schließt sich das Riemeistersee-Moor und die Krumme Lanke an. Die Krumme Lanke erreicht die bemerkenswerte Tiefe von 8 m. Eine sandige Uferzone nimmt eine Breite von 5 bis 15 m ein, darüber lagert sich nach der Seemitte zu Faulschlamm und Kalksapropel auf.

Der Schlachtensee erreicht eine Tiefe bis zu 8 m. Seine sandige Uferzone ist 5 bis 25 m breit. Der Faulschlamm in der Seemitte weist eine Mächtigkeit von 5 bis 9 m auf und wird noch von kalkhaltigen Schichten unterlagert.

Die Havel erreicht im Wannsee und nördlich von Schwanenwerder eine Tiefe von rd. 8 m und besitzt einen sandigen durchlässigen Strand.

III. Das Eindringen des Wassers in den Boden.

Von den Niederschlägen, die im Grunewald niederfallen, vermag nicht viel einen längeren oberirdischen Weg zurückzulegen, wie schon der Mangel offener Talzüge zeigt. Nur bei den Hängen, die unmittelbar zur Havel abfallen, ist ein unmittelbares oberirdisches Abfließen bis zum Vorfluter anzunehmen. Es handelt sich aber hier nur um einen recht kleinen Teil der ganzen Waldfläche. In zahlreichen Fällen legt das Wasser einen kurzen Weg oberirdisch zurück, bis es in eine Vertiefung oder einen der Seen

---

[1]) Grundwasserspiegel gespannt.

[2]) Grundwasserspiegel meist frei, unterhalb einer schwer durchlassenden Schicht. Bei höheren Wasserständen schwach gespannt.

[3]) Grundwasserspiegel erst in größerer Tiefe frei im Sande.

[4]) Die schwer durchlässigen Schichten liegen tiefer als die wasserführenden, deren Wasserstand gemessen wird.

Die Grundwasserbewegung im Grunewald bei Berlin.

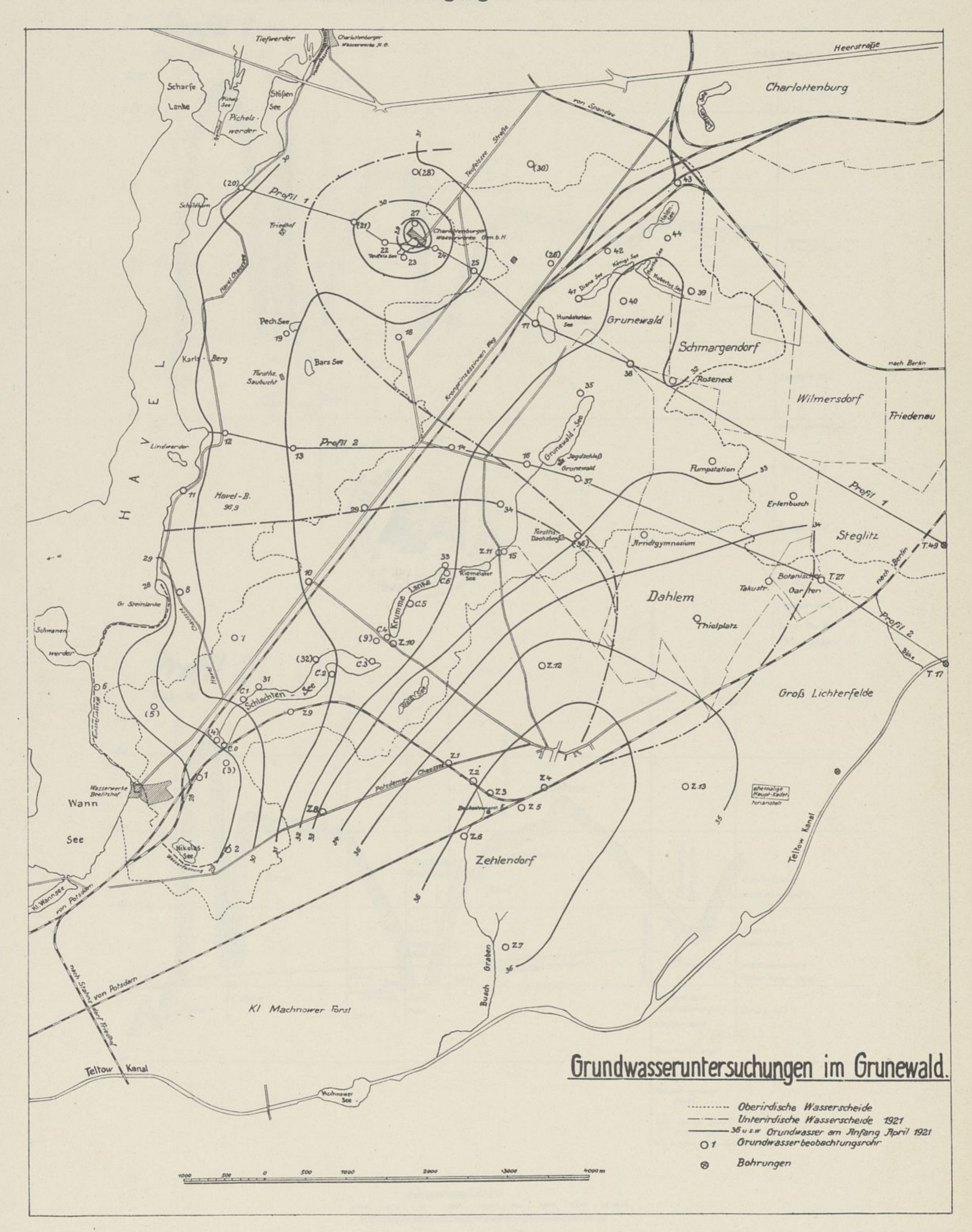


Abb. 1. Lageplan mit Höhenschichtenlinien des Grundwasserspiegels.

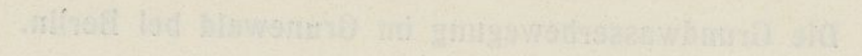
Verlag von Guido Hackebeil A.-G., Berlin S 14.


HAUPTBÜCHEREI D. TECHNISCHEN HOCHSCHULE
BRESLAU

Die Grundwasserbewegung im Grunewald bei Berlin.

Abb. 2. Schnitte quer zur Havel (vergl. Tafel 1).
Für die Längen 1 : 75000, für die Höhen 1 : 600.

Verlag von Guido Hackebeil A.-G., Berlin S 14.



gelangt, wo es dann teils versickert, teils verdunstet. Ein großer Teil des Niederschlagswassers legt überhaupt keinen Weg an der Geländeoberfläche zurück und versickert oder verdunstet an der Stelle des Niederfallens. Das in den Boden eindringende Wasser wird unterschieden in „Haftwasser, das durch kapillare Anziehungskräfte von den Bodenteilchen festgehalten wird, in Sickerwasser,*) das sich im Boden in Berührung mit Bodenluft abwärts bewegt und in Grundwasser, das die Bodenporen ganz ausfüllt und bei genügendem Gefälle in seitlicher Richtung fließt. Eine besondere Stellung nimmt noch die Bodenzone dicht über dem Grundwasserspiegel ein, die an Wasser stark angereichert ist. Wird aus dieser Zone Wasser durch die Pflanzenwurzeln abgesogen, so steigt neues vom Grundwasser aus empor. Sinkt aber der Grundwasserspiegel, so sinkt auch dies Wasser ab. Einige Beobachtungen über den Wassergehalt der Bodenschichten hatte die geologische Landesanstalt bei Gelegenheit der Ausführung der Bohrungen von Meter zu Meter vorgenommen. Keilhack hat darüber folgendes berichtet: (21)

„Recht interessante und merkwürdige Ergebnisse hat die Untersuchung des Wassergehaltes der einzelnen Sandschichten geliefert. Es hat sich gezeigt, daß äußerst wasserarme Sande mit nur wenig Prozent Wasser mit wasserreichen Sanden, deren Wassergehalt auf 15 bis 20 v H steigt, abwechseln, ein Wechsel, der mit Sicherheit für eine Versickerung der Niederschläge spricht. Vielleicht wird es sogar möglich sein, gewisse Gesetzmäßigkeiten in diesen Verhältnissen zu ermitteln.“ In einem Bericht an den Schutzverband für die Grunewaldseen schrieb Keilhack:

„Der Wassergehalt ist in allen Proben oberhalb des Wasserspiegels von Meter zu Meter bestimmt. Völlig gleiche Bildungen zeigen sehr ungleiche Wassergehalte und lassen Schwankungen erkennen, die sich zwischen weniger als 1 v H und mehr als 20 v H bewegen. Nirgends zeigt der Wassergehalt eine volle Sättigung des Sandes an. Es handelt sich also in allen Fällen entweder um kapillar gebundenes Wasser oder um Niederschlagswasser, welches auf der Wanderung in die Tiefe begriffen ist. Es soll versucht werden, Beziehungen der versickernden Wassermengen zu bestimmten Niederschlagsperioden zu ermitteln.“

Dieser wichtige Versuch Keilhacks, das versickerte Wasser im Boden in der Natur weiter zu verfolgen, steht noch recht vereinzelt da. Es ist vielmehr eine Lücke in der Gewässerkunde, daß ausreichende Untersuchungen über den periodischen Wechsel des Gehaltes des Bodens an Haftwasser und Sickerwasser nicht vorliegen. Die Landesanstalt für Gewässerkunde hatte die Absicht, solche Untersuchungen im Anschluß an die Grundwasserbeobachtungen im Grunewalde einzurichten, ist aber infolge der Ungunst der Zeitverhältnisse bisher nicht dazu gekommen.

Bereits durch den Augenschein in den benachbarten Gärten ließ sich auch ohne Wägungen erkennen, daß der Wassergehalt der oberen Bodenschichten sehr starken Schwankungen unterliegt. Wohl in jedem Sommer tritt ein oder mehrere Male eine Dürrezeit ein, in der die oberste Bodenschicht allgemein staubtrocken wird. Eine derartige Austrocknung tritt leichter unter einem mit Getreide, Gras, Erbsen u. dergl. bestandenen Boden ein als unter einem gehackt oder geeggt offen daliegenden. Laufende Aufzeichnungen über derartige Erscheinungen, die für die Kenntnis des Wasserkreislaufes in den einzelnen Jahren von großer Bedeutung wären, könnten mit bescheidenen Mitteln eingerichtet werden.

Von Bedeutung ist die Frage, wie lange es dauert, bis das versickerte Wasser den Grundwasserspiegel erreicht. Nach Versuchen von Scheelhase bei Frankfurt a. Main kann das Wasser im Sande um ½ bis 1 m am Tage abwärts dringen. Es handelt sich dabei aber um Höchstwerte, die bei künstlicher reichlicher Versickerung erzielt worden sind; bei der natürlichen Versickerung wird die Bewegung langsamer vor sich gehen, und es kann daher im Grunewald einen bis mehrere Monate dauern, bis versickertes Wasser den Grundwasserspiegel erreicht, selbst wenn die durchsunkenen Bodenschichten reichlich Haftwasser enthalten. Ist dies aber nicht der Fall, sind die oberen Bodenschichten vielmehr durch Verdunstung in Dürrezeiten an Haftwasser verarmt, so wird das Sickerwasser zunächst zur Ergänzung des Haftwassers verbraucht und erst das später eindringende Sickerwasser kann in die Tiefe dringen.

Es kann also bei den Gelände- und Bodenverhältnissen des Grunewaldes nach einer Dürrezeit die das Grundwasser erreichende Sickerwassermenge auf Monate, ja vielleicht auf etwa ein Jahr hinaus vermindert werden.

Sind dagegen die Bodenschichten infolge reichlicher Niederschläge bei kühler Witterung gründlich mit Haft- und Sickerwasser durchtränkt, so wird von oben neu hinzutretendes Sickerwasser die absteigende Bewegung des Wassers befördern und verhältnismäßig schnell zu einem Anstieg des Grundwasserspiegels führen.

Die Zeit, die vergeht, bis an der Oberfläche einsickerndes Wasser auf das Grundwasser wirkt, wird daher starken Schwankungen unterliegen.

Die Frage, wie die Sickerwassermengen mit den Jahreszeiten und der Witterung schwanken, ist weiter hinten im meteorologischen Teil eingehend behandelt worden.

IV. Frühere gewässerkundliche Untersuchungen, Ueberblick über die Wasserstandsschwankungen vor der Einrichtung der regelmäßigen Grundwasserstandsmessungen.

Die ersten gewässerkundlichen Untersuchungen im Grunewalde rühren von Veitmeyer (1) her. Er beobachtete, daß bei Niedrigwasser am Ostufer des Wannsees zahlreiche Quellen sichtbar waren. Daraus läßt sich schließen, daß damals das Grundwasser der Havel zufloß und daß dieser Zustand bei Niedrigwasser verstärkt wurde. Auf diese Quellen war wohl auch die Bezeichnung „Klare Lanke“ für die Bucht nördlich vom Schwanenwerder zurückzuführen. Das Wasser des Schlachtensees stand damals 8,8′ (= 2,762 m) höher als in der Havel.

Ferner verdanken wir Veitmeyer eine Mitteilung, daß in einer rd. 60′ (= 19 m) tiefen Bohrung am Teltower See gespanntes Wasser angetroffen worden ist, das 4′ (= 1,26 m) über dem Seespiegel selbsttätig ausfloß. Auch diese Beobachtung zeigt, daß das Grundwasser gegenüber den offenen Gewässern Ueberdruck besaß, also diesen zufloß.

Im Jahre 1871/72 war von der Westend-Gesellschaft der Bau eines kleinen Wasserwerks am Teufelssee im Grunewald begonnen worden, das die Aktiengesellschaft Charlottenburger Wasserwerke im Jahre 1878 übernahm und im Jahre 1886 mit einer Belüftungsanlage zur Ausfällung des Eisens versah. Im Jahre 1892 wurde eine nachfolgende Filtration zur Zurückhaltung des ausgeschiedenen Eisens eingerichtet, und es war so die Technik genügend weit vorgeschritten, um eine Wasserversorgung im Großbetrieb zu ermöglichen. Dieselbe Gesellschaft nahm im Jahre 1893/94 die Grundwasserförderung in Beelitzhof in größerem Maßstabe auf. Im Jahre 1895 eröffnete sie nördlich vom Grunewaldgebiet bereits jenseits der Spree das Wasserwerk am Nonnendamm (jetzt Siemensstadt) auf Spandauer Gelände zur Versorgung der Stadt Charlottenburg. Später ist dies Werk und das Werk Teufelssee an die städtische G. m. b. H. Charlottenburger Wasserwerke übergegangen; das Werk in Beelitzhof blieb Privatbesitz der Firma Charlottenburger Wasser- und Industriewerke.

*) Der Begriff Sickerwasser wird in dem geologischen Schrifttum vielfach auch in einem anderen Sinne gebraucht. Eine feste und zweckmäßige Begrenzung des Begriffes, deren allgemeine Anwendung zu wünschen ist, findet sich z. B. bei Wollny, Scheelhase, Keller und Mitscherlich.

Zahlentafel I. Wasserstände in m über N. N.

	Nov.	Dez.	Jan.	Febr.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Winter	Sommer	Jahr
Grunewaldsee															
M 1891/95	33.25	33,29	33.30	33,34	33,34	33,34	33.30	33,26	33,22	33,19	33,16	33,22	33 31	33.22	33.27
M 1906/10	32,69	32 74	32,73	32 73	32,77	32,76	32.79	32.76	32.77	32,76	32.75	32,72	32 74	32,74	32,75
M 1911/15	32,21	32.17	32,22	32,24	32,28	32,29	32.26	32.21	32,18	32.15	32,14	32,10	32.24	32,17	32.20
M 1916/20	32,36	30,35	32,42	32,44	32 48	32,47	32,43	32,40	32,40	32,41	32,40	32,38	32,42	32,40	32,41
Krumme Lanke															
M 1911/15	31.47	31,51	31.67	31,55	31,53	31,56	31,65	31,61	31.58	31,50	31.49	31,45	31,55	31,55	31.55
M 1916/20	31,39	31,56	31,62	31,68	31,67	31,64	31,66	31,64	31,57	31,53	31,51	31,44	31,60	31,56	31,58
Schlachtensee															
M 1911/15	30,84	30.78	31.07	30.76	31,11	31.13	31,20	31,20	31,17	30.88	31,01	30,94	30,95	31,06	31,01
M 1916/20	31.42	31,55	31,56	31.54	31,57	31.52	31,58	31,61	31,58	31.59	31,53	31,47	31,53	31,56	31,55
Havel bei Sakrow															
M 1911/15	29,42	29.57	29,73	29.73	29,87	29.76	29,39	29.24	29,16	29.09	29.14	29 25	29,68	29.21	29.45
M 1916/20	29,53	29,73	30,09	30,05	29,88	29,80	29,51	29,26	29,31	29,26	29,30	29,32	29 85	29,33	29,59

Der städtische Hydrologe Piefke (4) teilte 1900 mit, daß das Wasserwerk Beelitzhof damals aus einer 2 km langen Wasserfassung täglich 19000 cbm zutage fördere, angeblich ohne den Grundwasserspiegel in der Umgebung abzusenken.

Einen beträchtlichen Eingriff in die Grundwasserstände der weiteren Umgebung des Grunewaldes bewirkte der Bau des Teltowkanals. Leider wurde damals kein Beobachtungsdienst zur Feststellung dieser Veränderungen eingerichtet. Mit der Bauausführung wurde Anfang April 1901 begonnen; im Jahre 1906 war der Kanal im wesentlichen fertiggestellt. Unterhalb der Machnower Schleuse wurden die Wasserstände auf diejenigen der Havel (d. i. um rd. 1 m bei Mittelwasser) abgesenkt (Niedrigwasser N.N. + 28,97, Mittelwasser N.N. + 29,56, Hochwasser N.N. + 30,54 m, Kanalsohle N.N. + 26,47 m).

Auch oberhalb der Schleuse in der Spreehaltung trat eine Absenkung der Wasserstände ein (Niedrigwasser N.N. + 32,20, Normalwasser N.N. + 32,30 m entsprechend dem durch den Mühlendammstau gehaltenen Wasserstande der Oberspree; Hochwasser von N.N. + 33,04 an der Abzweigung von der Spree bis N.N. + 32,30 an der Schleuse; Kanalsohle N.N. + 29,70 m). Der Machnower See wurde dadurch um rd. 55 cm von N.N. + 32,85 auf N.N. + 32,30 m abgesenkt. Der versumpfte Schönower See, der zwischen dem Zehlendorfer Ortsteil Schönow und Teltow auf rd. N.N. + 35,26 m lag, wurde vollständig trockengelegt und der Teltow-See von N.N. + 35,30 auf N.N. + 32,30 m abgesenkt, wobei der Rest mit Baggermassen aufgelandet wurde.

Beobachtungen der Wasserstände sind im Hubertussee, Halensee, Hundekehlensee und Grunewaldsee von der Kurfürstendammgesellschaft im April 1890 aufgenommen und später von der Gemeinde Berlin-Grunewald und dem städtischen Tiefbauamt fortgesetzt worden. Am Schlachtensee und der Krummen Lanke hat die Gemeinde Berlin-Zehlendorf in den Jahren 1889 bis 1908 vereinzelte und später regelmäßigere Wasserstandsmessungen vorgenommen (Zahlentafel 1).

Bei Gelegenheit eines Vertragsabschlusses zwischen der Regierung in Potsdam und den Charlottenburger Wasser- und Industriewerken im Jahre 1913 wurde bekannt, daß diese im Grunewald Grundwasserstandsbeobachtungen ausführten, die nach dem Vertrage von nun an zur Kenntnis der Regierung kommen mußten. Die Verpflichtung, die die Wasserwerke durch den Vertrag übernahmen, ist jedoch nur ganz allgemein gehalten, Einzelangaben über Zahl, Lage und Ausführung der Rohre, sowie über die Häufigkeit der Beobachtungen fehlen. Eine eingehende Aufklärung der gewässerkundlichen Verhältnisse konnte diese Vertragsbestimmung also nicht gewährleisten.

Ueber die Wasserstände im vorigen Jahrhundert läßt sich bei dem Fehlen von Grundwasserbeobachtungen und der Lückenhaftigkeit der Messungen in den Seen kein genaues Bild gewinnen. Als Beispiel sind in der nebenstehenden Zahlentafel die Jahrfünftmittel des mitten im Walde gelegenen Grunewaldsees mitgeteilt. Man sieht hier, daß die Wasserstände des Jahrfünfts 1891/95 später nicht wieder erreicht worden sind. Die tiefsten Wasserstände weist das Jahrfünft 1911/15 auf. Aehnlich ist der Verlauf beim Hundekehlensee. Dieser hatte im Jahre 1890 am 1. August den hohen Stand von N.N. + 33,77 m erreicht, blieb aber bereits in den Jahren 1893 bis 1898 unter N.N. + 33 m. Im Jahre 1906 sank er sogar unter N.N. + 32,5 und überschritt in den nächsten Jahren nicht mehr N.N. + 32,70 m. Ein auffälliges Sinken begann im Mai 1911 und dauerte bis November 1913; beide Seen fielen dabei bis unter N.N. + 32 m. Bis zum Jahre 1913 hatte der Grunewaldsee einen höheren Stand als der Hundekehlensee; seit 1913 ist es umgekehrt.

Noch viel größer als beim Grunewaldsee und Hundekehlensee war das Sinken des Wasserspiegels bei der Krummen Lanke und dem Schlachtensee. Auch in der Havel zeigten sich vom Mai 1911 bis November 1913 ungewöhnlich tiefe Wasserstände. Aus den Wasserständen der offenen Gewässer läßt sich ein Schluß auf die Grundwasserstände ziehen, und es ist daher anzunehmen, daß diese 1913 im Grunewalde einen ungewöhnlich tiefen Stand hatten, wobei teils natürliche Ursachen*), teils die Zutageförderung unterirdischen Wassers durch die Wasserwerke einwirkten.

Bei der erstmaligen Auffüllung des Schlachtensees, die am 4. März 1913 begann, wurde der Seespiegel binnen sechs Wochen um 1,60 m gehoben. Nach Kellers Berechnungen (24a) stieg dabei der Grundwasserspiegel am Seeufer sprunghaft um 0,90 m an.

Im Jahre 1914 wurden die Beobachtungsrohre auf Kosten des Schutzverbandes gesetzt. Ein Versuch, schon damals einen Gesamtüberblick über die Grundwasserstände im Grunewald zu erhalten, scheiterte daran, daß die Nivellements fehlerhaft waren.

In den Jahren 1914 bis 1917 stiegen die Wasserstände im Grunewaldsee und Hundekehlensee erheblich an. Es ist dies wohl auf ein in diesen Jahren allgemein im Spree- und Havelgebiet beobachtetes Steigen des Grundwasserspiegels, zum Teil auch auf eine günstige Rückwirkung der Auffüllung des Schlachtensees zurückzuführen. Die übergepumpten Wassermengen sind in Teil VI angegeben.

*) Vergleiche den Abschnitt über die meteorologischen Einwirkungen S. 11-17.

Der Spiegel des Schlachtensees wurde seit der Auffüllung in den Jahren 1913 und 1914 auf der vertragsmäßigen Höhe von rd. 31,60 m über N.N. gehalten. Der in den Rohren der Charlottenburger Wasserwerke gemessene benachbarte Grundwasserspiegel stand durchweg tiefer und sank vom Juli bis Oktober 1913 etwas. Vom 23. August bis 28. Oktober 1915 wurde das Ueberpumpen von Havelwasser in den Schlachtensee wegen Choleragefahr eingestellt. Das hatte ein Sinken des Seespiegels um rd. 64 cm zur Folge. Dabei sank das benachbarte Grundwasser ebenfalls beträchtlich, stieg aber alsbald wieder an, als der Seespiegel auf die vertragsmäßige Höhe gehoben wurde. Im Winter 1917 erreichte es einen besonders hohen Stand. Von nun an lassen sich die Vorgänge, da die Beobachtungen der Charlottenburger Wasserwerke nur in großen Zeitabständen erfolgten, besser an unseren Rohren 4, 31, 32 verfolgen (siehe unten und Abb. 8).

Der Wasserspiegel der Krummen Lanke wurde 1913 und 1914 durch Zuführung geringer Wassermassen auf der vertragsmäßigen Höhe gehalten und dann sich selbst überlassen. Die Unterbrechung der Auffüllung des Schlachtensees im Jahre 1915 hatte nur ein unbedeutendes Absinken der Krummen Lanke zur Folge. Der Grundwasserstand am Nordende der Krummen Lanke hatte bereits im Februar 1915 mit 31,60 m über N.N. die vertragsmäßige Höhe des Seespiegels erreicht, die er in der Folgezeit mehrfach überschritt (Abb. 5), so daß die Krumme Lanke wenigstens an diesem Ende wieder Grundwasserzufluß bekam, während am Südende der Grundwasserspiegel dauernd unter dem Seespiegel blieb.

V. Die Beobachtungsrohre.

Die bereits erwähnten neueren Grundwasserbeobachtungsrohre von 7 cm lichter Weite hat der Brunnenbauer Sander auf Kosten des Schutzverbandes für die Grunewaldseen unter Leitung der Geologischen Landesanstalt in der gleichen Weise ausgeführt, wie man Brunnen setzt. Sie stehen also mit ihrem unteren Ende in einer durchlässigen Sand- oder Kiesschicht. Hier sind sie auf einer Länge von 1 m durchlocht und mit einem Kupfergewebe umhüllt. Diese Maßnahme hat sich nicht vollkommen bewährt. Denn bei dem Rohr 17 trat eine vollständige Verstopfung des Gewebes durch Karbonate ein, so daß das Rohr schon im Jahre 1920 gezogen und mit Salzsäure abgebürstet werden mußte, wodurch es wieder vollständig durchlässig wurde. Im Jahre 1920 bei einigen anderen Rohren ausgeführte Versuche zeigten, daß das Filtergewebe im allgemeinen nach sechs Jahren noch durchaus durchlässig geblieben war. Als Verschluß waren Kappen mit Vorhängeschlössern verwandt worden, die sich nicht bewährt haben. Denn die Schlösser rosteten leicht ein und wurden auch nicht selten von Unbefugten entfernt, worauf die Rohre durch Einwerfen von Sand und Steinen unbrauchbar gemacht wurden. Soweit die Mittel reichten und die Weiterbeobachtung der Rohre besonders wichtig erschien, hat die Landesanstalt für Gewässerkunde Instandsetzungsarbeiten ausführen lassen. Jedoch ist die Zahl der beobachteten Rohre immer mehr zusammengeschmolzen. An drei Rohren hat die Landesanstalt für Gewässerkunde durch den Brunnenbauer Nilewsky einen zweckmäßigeren Verschluß anbringen lassen, der bisher unbeschädigt geblieben ist. (Vergl. W. Koehne: Die Einrichtung und Verwertung von Grundwasserstandsbeobachtungen. Deutsche Wasserwirtschaft. 1923. S. 40.)

VI. Die fließende Bewegung der Grundwasserströme.

Nachdem im Jahre 1917 die Landesanstalt für Gewässerkunde die Leitung der Beobachtungen übernommen und neue Nivellements veranlaßt hatte, konnten Höhenschichtenpläne des Grundwasserspiegels entworfen werden, die sich zunächst auf das Gebiet des Grunewaldes selbst und das der Gemeinde Zehlendorf beschränken mußten. Später kamen dann noch Beobachtungen in Dahlem hinzu. Allerdings waren inzwischen eine Anzahl der früheren Beobachtungsstellen im Walde durch Beschädigung der Rohre eingegangen. Die Dahlemer Beobachtungen boten aber eine so wertvolle Bereicherung des Gesamtbildes, daß es zweckmäßig schien, einen Plan vom April 1921 dieser Veröffentlichung beizugeben (Tafel 1). Der Verlauf der Linien in der Nähe des Wasserwerks Beelitzhof kann allerdings nur mit Vorbehalt wiedergegeben werden, da hier das Beobachtungsnetz recht lückenhaft ist. Dagegen ist die Umgebung des Wasserwerks Teufelssee reicher mit Rohren besetzt worden, weil der Schutzverband für die Grunewaldseen hier feststellen wollte, wie der Grundwasserspiegel bei der zu erwartenden Stillegung des Werks ansteigt. Im allgemeinen nimmt man an, daß die Fließrichtung des Grundwassers senkrecht zu den aus den Grundwasserbeobachtungen gewonnenen Höhenschichtenlinien des Grundwasserspiegels verläuft. Diese Annahme wird auch für das hier dargestellte Beobachtungsgebiet im allgemeinen zutreffen. Es läßt sich daraus schließen daß die oberirdische Wasserscheide für den unterirdischen Wasserabfluß gar keine Bedeutung besitzt. Eine unterirdische

Wasserscheide verläuft in der Richtung von Bahnhof Zehlendorf-Mitte nach dem Botanischen Garten. Von dieser unterirdischen Scheide aus fließt das Grundwasser teils nach Südosten zum Teltowkanal, teils nach Nordwesten ab.

Der nach Nordwesten fließende Grundwasserstrom erreichte ursprünglich die Havel. Später haben die zwei Wasserwerke durch ihren Pumpbetrieb je ein Stück aus diesem Strom herausgeschnitten und dabei neue künstliche Wasserscheiden erzeugt, die je nach der im Laufe mehrerer Jahre geförderten Wassermasse langsam hin- und herwandern. Das Zuflußgebiet, das der Havel geblieben ist, beschränkt sich daher jetzt fast nur noch auf Teilstücke des Grunewaldes nordwestlich der Seenkette.

Für Wasserversorgungszwecke ungemein wichtig ist die schwierige Frage nach der unterirdischen Abflußspende, d. i. der Wassermenge, die ein Quadratkilometer auf unterirdischem Wege an die Vorfluter abgibt. Auf Sandboden bei dauernd tiefer Lage des Grundwasserspiegels, wie wir sie im größten Teile des Grunewaldes vorfinden, wird sie begünstigt, da hier das Wasser größtenteils schnell in die Tiefe versickern und so dem offenen Abfluß und der Verdunstung entgehen kann. Besonders günstig ist es, wenn, wie in den Havelbergen im Grunewalde, ein solches Sandgebiet wellig ist und Senken ohne oberirdischen Abfluß enthält. Dann fließt das Wasser an den Hängen schnell herunter, so daß diese recht trocken bleiben und daher wenig verdunsten können. In den Senken, wo das Wasser versickert, wird die Verdunstung, trotzdem meist Feuchtigkeit vorhanden ist, vielfach dadurch hintangehalten, daß Schutz gegen Sonne und Wind vorhanden ist. Weniger günstig sind die Lehmböden (bei Dahlem und östlich Zehlendorf), bei denen ein großer Teil des Sickerwassers in den oberen Bodenschichten festgehalten wird und daher in Trockenzeiten wieder verdunsten kann und bei denen auch mehr Wasser oberirdisch abfließt.

Am ungünstigsten für die Abflußspende sind solche Flächen mit hohem Grundwasserstand, bei denen in der heißen Jahreszeit den Pflanzen ständig Wasser zur Verfügung steht und verdunsten kann. Als solche Gebiete kommen im Grunewalde und seiner Umgebung nur Moorflächen in Betracht, die aber nur einen sehr kleinen Bruchteil der ganzen Fläche einnehmen und überdies in den letzten Jahrzehnten durch die Grundwasserabsenkung wohl auch an Grundfeuchtigkeit verloren haben.

Die Gesamtabflußspende in der Berliner Gegend läßt sich nach den Abflußmengenmessungen an der oberen Havel bei Liebenwalde und an der Dahme bei Neue Mühle mit 120 mm, also nicht ganz 4 Liter/sek/qkm annehmen. Die unterirdische Abflußspende A_D im Durchschnitt des Gebietes muß geringer sein, da ja ein Teil des Wassers oberirdisch abfließt. Im einzelnen wird die unterirdische Abflußspende in ungünstigen Gebieten kleiner sein als A_D in günstigen, also vor allem sandigen Gebieten, größer als A_D. In Trockenzeiten geht der Abfluß in der Berliner Gegend etwa auf 1 Liter/sek. herab; in solchen Zeiten versiegen aber zahlreiche Grundwasseraustritte, z. B. in Gräben, und es ist daher anzunehmen, daß die unterirdische Abflußspende im Durchschnitt wesentlich höher ist. Anhaltspunkte zur Beurteilung der unterirdischen Abflußspende bieten auch die Fördermengen der Wasserwerke. Im einzelnen entstehen allerdings auch hierbei Ungenauigkeiten dadurch, daß die meisten Wasserwerke, wie z. B. das von Beelitzhof, an den Flüssen liegen und nicht nur Grundwasser, sondern auch in den Untergrund eingedrungenes Flußwasser fördern. Günstiger für die Berechnung sind Wasserwerke wie dasjenige am Teufelssee, die keinerlei Flußwasser erhalten können. Erschwert wird hier die Berechnung aber wieder dadurch, daß das Zuflußgebiet dieses Wasserwerks sich nicht auf den Grunewald beschränkt, sondern in das Gebiet der besiedelten Vororte übergreift, wo der Grundwasserspiegel zahlreichen künstlichen, im einzelnen nicht recht zu verfolgenden Einflüssen ausgesetzt ist.

Nach den vorliegenden Erfahrungen läßt sich die durchschnittliche unterirdische Abflußspende im Grunewalde auf etwa 4 Liter/sek schätzen (120—130 mm/Jahr). Hieraus läßt sich auch ein ungefährer Anhalt zur Beurteilung der Fließgeschwindigkeit des Grundwassers gewinnen. In der Nähe der Grundwasserscheide in Zehlendorf und Dahlem ist das Gefälle für das von ihr nach Nordwesten abfließende Wasser sehr klein, die abfließende Wassermenge ist auch sehr klein; die Fließgeschwindigkeit des abfließenden Wassers also ebenfalls sehr gering. Mit der Entfernung von dieser Wasserscheide muß die durchfließende Wassermenge immer größer werden. Bei einförmigen Bodenverhältnissen müßte der Grundwasserspiegel von der Grundwasserscheide bis zur Havel eine gesetzmäßige Krümmung aufweisen, und es müßte die Fließgeschwindigkeit immer mehr zunehmen. Der Wechsel der Bodenverhältnisse bringt aber viele Störungen mit sich; insbesondere ist das Gefälle in den schwerer durchlässigen Gebieten steiler. Nehmen wir als Beispiel eine Stelle mitten im Grunewalde an, die 5 km von der Wasserscheide entfernt liegt, so ist die auf einen Meter Breite des Grundwasserstroms durchfließende Wassermenge:

$$5000 \,.\, 0{,}120 \text{ bis } 5000 \,.\, 0{,}130 = \text{rd. } 630 \text{ cbm/Jahr.}$$

Nimmt man die Tiefe des fließenden Grundwasserstromes mit 10 (bis 20) m an, wovon der fünfte Teil, also 2 (bis 4) m für die Grundwasserbewegung offen ist, so ergibt sich eine Geschwindigkeit von $\frac{630}{2} = 315$ m/Jahr (bis $\frac{630}{4} = 157$). Tatsächlich wird die Geschwindigkeit in den feineren Lagen im Grundwasserstrom eine geringere sein als in den gröberen, so daß man für diese wohl Geschwindigkeiten von etwa 1 m am Tag wird annehmen können. Das Grundwasser braucht also jedenfalls jahrelang zur Zurücklegung des Weges von der Grundwasserscheide bis zur Havel. In der Nähe der Havel schwanken die Fließgeschwindigkeiten des unterirdischen Wassers je nach dem Flußwasserstand (vergl. unten); sie mögen bei schnell sinkendem Havelspiegel bis zu 10 m/Tag steigen; hiermit im Einklang steht die Beobachtung, daß die Absenkung des freien Grundwasserspiegels durch ein Niedrigwasser der Havel sich Hunderte von Metern landeinwärts erstrecken kann.

Beim Wasserwerk Beelitzhof würde sich, wenn man die Größe des Zuflußgebietes mit rd. 27 qkm und die unterirdische Abflußspende sehr reichlich mit 5 Liter/sek/qkm annimmt, ein Grundwasserzufluß von 135 Liter/sek = 4¼ Millionen cbm/Jahr ergeben. Allerdings ist es denkbar, daß es zwei verschiedene unterirdische Wasserscheiden gibt, eine für das obere Grundwasser und eine andere für das Grundwasser in tieferen Schichten. Es wäre daher vielleicht nicht ausgeschlossen, daß das unterirdische Zuflußgebiet noch etwas größer ist, als es nach den Grundwasserbeobachtungen erscheint, und daher 6 bis 7 Millionen cbm der Fördermenge im Jahr im Durchschnitt dem Grundwasser entstammen. Soweit die jährliche Fördermenge im Durchschnitt diesen Betrag übersteigt, ist sie auf Zufluß von Havelwasser zurückzuführen. Wie groß die Durchlässigkeit des Sandes am Havelufer neben den Wasserfassungen des Wasserwerkes ist, kann man durch einen sehr einfachen Versuch augenfällig machen. Man braucht nur eine kleine Vertiefung am Strande zu graben und durch einen kleinen Kanal Wasser hineinzuleiten, so sieht man, wie das Wasser ständig zufließt und in der Vertiefung dauernd verschwindet.

Ein Teil des Wassers, das das Wasserwerk Beelitzhof zutage fördert, wird auch durch die Wassermassen ersetzt, die im Schlachtensee versickern. In den Jahren 1913 bis 1915 ist sowohl in den Schlachtensee wie die Krumme Lanke Wasser übergepumpt worden; von 1916 ab hielt sich die Krumme Lanke von selbst ungefähr auf der vertragsmäßigen Höhe, und es wurde nur noch in den Schlachtensee Wasser eingelassen (vergl. die nachstehende Zahlentafel 2).

Die in den Schlachtensee in einem Jahre übergeführte Wassermasse hat ihren höchsten Betrag im Jahre 1918 mit 2,9 Millionen cbm = 7,34 cbm je qm Seefläche erreicht. Daß dieser Höchstbetrag erst im fünften Jahre der künstlichen Wasserzufuhr erreicht wurde, spricht nicht für eine merkbar zunehmende Abdichtung des Seebodens.

In strengen Wintern bei Eisstand ist kein Wasser übergepumpt worden. Auffallend gering war die übergeführte Wassermenge auch im Winter 1921 und vor allem im Jahre 1923.

Für die Frage, wieviel von diesem Wasser verdunstet ist und wieviel somit zum Grundwasser abgewandert ist, sind die Verdunstungsmessungen der Landesanstalt für Gewässerkunde (33) heranzuziehen. Der Ueberschuß der Verdunstung über den Niederschlag kann allerdings für den Schlachtensee nur roh geschätzt werden, da weder Verdunstungs- noch Niederschlagsmessungen auf dem See ausgeführt worden sind. Wie bereits vorhin erwähnt, kommt hinzu, daß dem See von den Uferhängen Wassermengen zufließen, die dem auf die Seefläche selbst fallenden Niederschlag hinzuzuählen sind. Keller hatte in seiner Veröffentlichung (22) die Verdunstungszahlen vom Grimnitzsee zugrunde gelegt, die für den Schlachtensee zwar zu hoch sein dürften, aber doch einen guten Anhalt zur Beurteilung der Sachlage bieten. Danach betrug im trockenen Sommer 1913 die Verdunstung rd. 0,700 cbm je qm, der Niederschlag 0,240 cbm je qm, der Verdunstungsüberschuß also 0,460 cbm je qm entsprechend einer Masse von 183 000 cbm auf rd. 400 000 qm Seefläche. In den Wintermonaten überwiegt der Niederschlag in der Regel über die Verdunstung. Im Vergleich zu der in den Schlachtensee übergepumpten Wassermasse spielt also der Verdunstungsüberschuß nur eine bescheidene Rolle, und der Löwenanteil fällt der Versickerung zu. (Vergl. auch S. 6.)

Zu erörtern ist noch die Frage, ob die im Grundwasserstrom abfließende Wassermenge ähnlichen Schwankungen unterliegt wie der Abfluß im offenen Gewässer. Bei den Flüssen ist der Unterschied in der Wasserführung bei Niedrigwasser, Mittel- und Hochwasser oft so groß, daß die Hochwasserführung ein Vielfaches der Niedrigwasser-, ja sogar der Mittelwasserführung beträgt; nicht nur der durchflossene Querschnitt ist bei Hochwasser größer, sondern auch die Geschwindigkeit der Wasserbewegung nimmt erheblich zu. Von diesen auch für die Flüsse der Mark kennzeichnenden Erscheinungen ist bei unserm Grundwasserstrom nicht das geringste wahrzunehmen. Während bei offenen Flüssen die Fließgeschwindigkeit bei steigendem Wasserstand ohne weiteres beträchtlich zunimmt,

Zahlentafel 2.

Einleitung von Havelwasser
in den Schlachtensee (rd. 400 000 qm) und
in die Krumme Lanke (rd. 150 000 qm).

A. Kubikmeter je Quadratmeter Seefläche = Wasserhöhe in Metern.
Beginn März 1913, Unterbrechung wegen Choleragefahr
vom 23. August 1915 bis 28. Oktober 1915.

		Winter	Sommer	Abflußjahr
1913	Schlachtensee	3,114	4,032	7,146
1913	Krumme Lanke		1,38	1,38
1914	Schlachtensee	2,498	2,786	5,284
1914	Krumme Lanke	0,167	0,401	0,568
1915	Schlachtensee	1,656	2,541	4,197
1915	Krumme Lanke	0,165	0,326	0,491
1916	Schlachtensee	2,613	3,087	5,700
1917	„	1,676	4,437	6,113
1918	„	2,802	4,538	7,340
1919	„	2,752	2,917	5,669
1920	„	1,243	3,219	4,462
1921	„	0,896	2 308	3,204
1922	„	1,842	2,580	4,422
1923	„	0,579	1,692	2,271

B. 1000 cbm in den Schlachtensee.

	1916	1917	1918	1919	1920	1921	1922	1923
November ...	205,2	201,2	177,8	229,6	198,4	87,6	185,8	11,2
Dezember ...	213,8	83,8	246 2	170,0	165,0	—	198,6	11,8
Januar	176,6	123,4	103,2	126,4	—	54,8	—	34,0
Februar	170,6	—	99,4	217,0	—	34,0	33,8	—
März	119,8	42,0	293,0	167,8	—	61,4	161,2	21,4
April	159,2	220,2	201,2	190,2	134 0	120,6	157,4	153,2
Mai..........	220,2	223,6	160,0	140,4	270,0	165,0	100,0	172,4
Juni	200,6	212,8	335,8	186 2	191,6	130,0	179,0	56,2
Juli..........	205,2	293,0	287,2	180,4	206,8	201,4	160,0	192,4
August	227,6	415,8	357,4	257 4	190,2	167,4	172,0	157,0
September ...	228,2	308 0	282,4	218,2	211,4	95,6	172,0	56,8
Oktober	153,6	321,6	392,4	184 2	217,6	163,8	157,8	42,2
Winter	1045,2	670,6	1120,8	1101,0	497,4	358,4	736,8	231,6
Sommer	1234,8	1774,8	1815,2	1166 8	1287,5	923,2	1032,0	677,0
Jahr	**2280**	**2445**	**2936**	**2268**	**1785**	**1282**	**1769**	**909**

ist das beim Grundwasserstrom nicht der Fall. Hier ist nach dem bei geringem Gefälle im Sande gültigen Gesetz von Darcy die Geschwindigkeit verhältnisgleich dem Gefälle. Dies bleibt aber bei unserem Grundwasserstrom, wie die Abbildung 1 zeigt, bei Hebungen und Senkungen des Wasserspiegels im allgemeinen gleich, soweit nicht örtliche Störungen durch die Havel, die Wasserwerke usw. veranlaßt werden.

Bei gleicher Fließgeschwindigkeit nimmt die fließende Wassermenge mit der Tiefe des Stromes zu, sie wird also bei steigendem Wasserspiegel größer. Nun ist zwar nicht genau bekannt, bis zu welcher Tiefe das Grundwasser in Bewegung ist. Jedenfalls beträgt diese Tiefe aber eine ganze Anzahl von Metern, 10, 20, vielleicht 30 m, während die Schwankungen sich auf Dezimeter beschränken. Dazu kommt noch, daß die Fließbewegung im Grundwasserstrom vorwiegend in den durchlässigsten gröberen und gleichkörnigen Schichten von statten geht, zwischen denen stets weniger durchlässige Schichten liegen, in denen sich das Wasser viel langsamer fortbewegt. Fällt zufällig der Grundwasserspiegel gerade in eine derartige besonders durchlässige Schicht, so wird sich beim Anstieg eine wesentliche Vermehrung der durchfließenden Wassermenge einstellen. Es ist im allgemeinen wenig wahrscheinlich, daß der Grundwasserspiegel gerade in eine solche bevorzugte Schicht fällt, und es wird daher der Wechsel in der Wasserführung unseres Grundwasserstromes nur geringfügig sein. Von Hochwasserwellen, die wie bei den offenen Gewässern durchlaufen, kann hier keine Rede sein. Der Mehrbetrag an Sickerwasser, der den durchschnittlichen Betrag übersteigt, wird vielmehr im wesentlichen im Grundwasser gespeichert. Eine solche Aufspeicherung wird als Hebung des Grundwasserspiegels sichtbar. Bliebe nach einer solchen Hebung der Sickerwasserzudrang zum Grundwasserspiegel gleichmäßig dem Durchschnitt entsprechend, so würde es bei der fast ganz gleichmäßigen Wasserführung des Grundwasserstromes im Walde viele Jahre dauern, bis die Hebung wieder abgetragen ist. In der Regel wird aber infolge des Wechsels feuchter und trockener Jahre ein Sinken des Grundwasserspiegels dadurch eintreten, daß eine Zeitlang der Sickerwasserzudrang zum unterirdischen Wasserspiegel die durchschnittliche Menge nicht erreicht. Im Grundwasserstand summiert sich die Einwirkung des Sickerwasserzudranges einer ganzen Reihe von Jahren. Eine Aenderung der den Grundwasserspiegel erreichenden Sickerwassermenge muß sich im Grunewalde in der Regel ohne Verzögerung in Gestalt von Hebungen und Senkungen des Grundwasserspiegels bemerbar machen. Zu beachten ist dabei, wie oben erwähnt, daß das Sickerwasser beträchtliche Zeit von der Geländeoberfläche zum Grundwasserspiegel braucht.

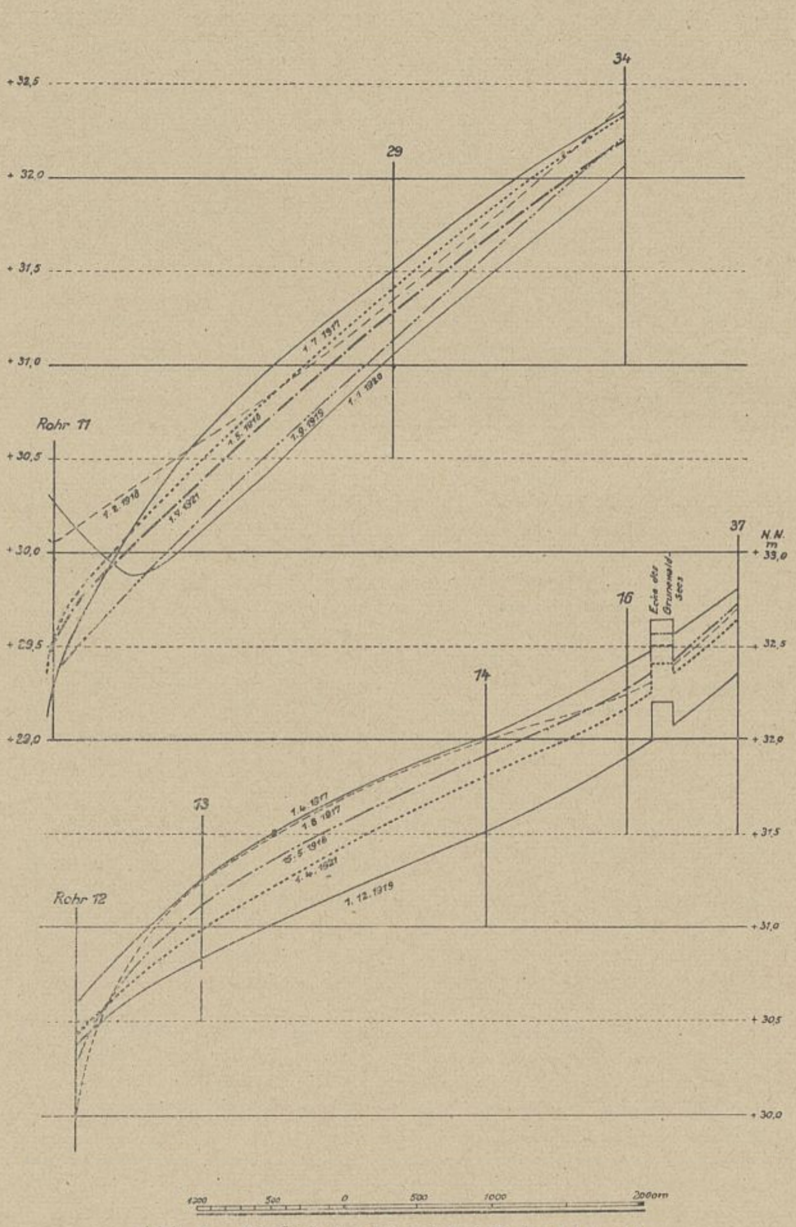


Abb. 1. Einfluß der Havel bei Rohr 11 u. 12.
Parallelverschiebung des Grundwasserspiegels ohne wesentliche Gefälleänderung in dem fern von der Havel und den Wasserwerken gelegenen Waldgebiet.

Die vorstehenden Ausführungen zeigen, daß das Grundwasser in Zeiten des Ueberflusses als großes Sammelbecken wirkt, das in Zeiten des Mangels Wasser abgibt. Wird dabei der Grundwasserspiegel um 50 cm erniedrigt bei einem Porenraum von ⅕, so werden je Quadratkilometer 100 000 cbm Wasser abgegeben. Wollten wir diese Rechnung auf das gesamte Havelgebiet übertragen (24 350 qkm), so kämen wir zu dem Ergebnis, daß das Grundwasser in diesem Gebiet einem Speicherbecken von 2435 Millionen cbm Fassungsraum entspricht. Vergleichen wir diese Zahl mit dem Inhalt künstlicher Staubecken, so erkennen wir, welche große Bedeutung das Grundwasser im Wasserhaushalt als Speicher besitzt.

VII. Zeitlicher Verlauf der Wasserstände seit 1917.

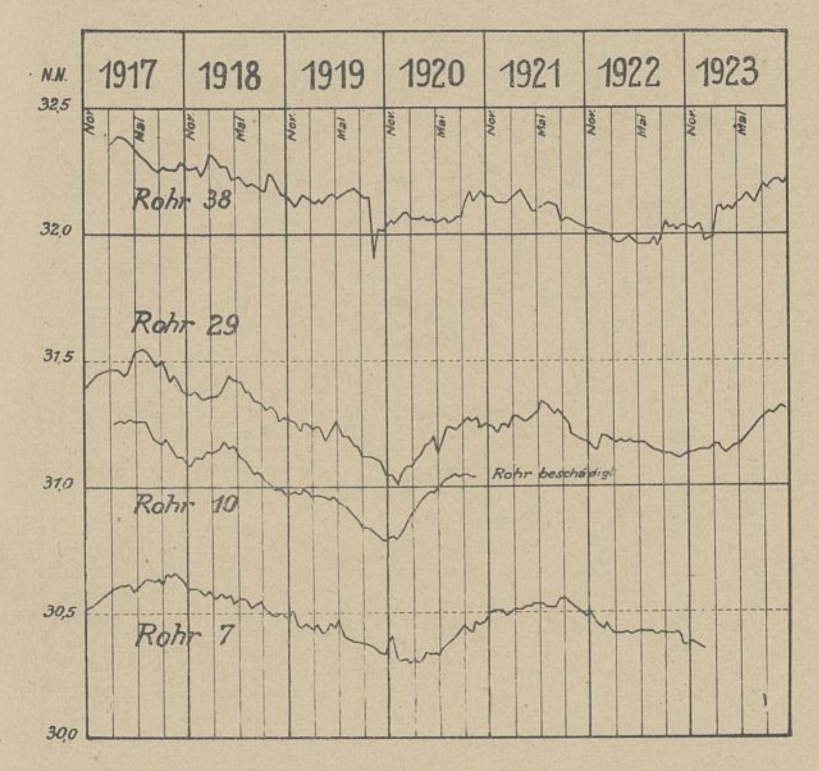
Im folgenden soll zunächst der Verlauf der Grundwasserstandsschwankungen selbst besprochen werden; der wechselnde Einfluß, den die Witterung darauf ausübt, ist weiter unten erörtert.

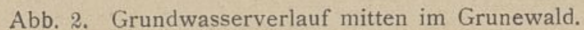
Die einzelnen Rohre sind zu Gruppen zusammengefaßt, die gewisse Uebereinstimmungen sowohl im Verlauf der Schwankungen als auch in der Lage zu den Wasserwerken, der Havel usw. erkennen lassen.

Gruppe 1.

Grundwasser mitten im Walde, das von den Wasserwerken, der Havel und den Seen weniger beeinflußt wird (Abb. 2).

Der Wasserhaushalt spielt sich hier in der Weise ab, daß ein annähernd gleichmäßiger Abfluß des Grundwassers stattfindet, so daß




Abb. 2. Grundwasserverlauf mitten im Grunewald.

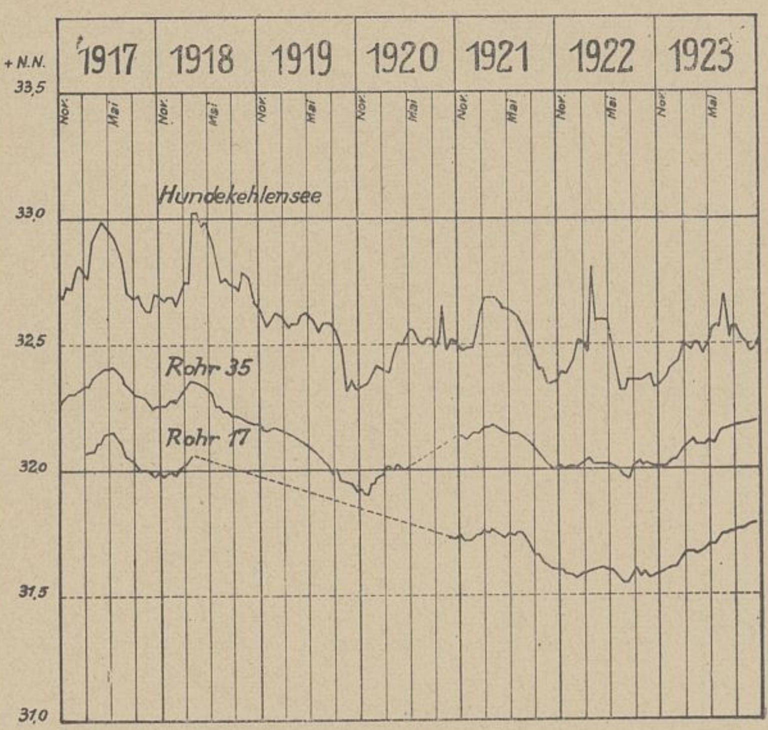


Abb. 3. Grundwasser im Zuge der Grunewaldseen.

sich der Grundwasserspiegel senken müßte, wenn er nicht immer wieder durch versickertes Wasser erhöht würde. Die Schwankungen des Wasserspiegels zeigen also an, welchen Veränderungen die Sickerwassermengen unterliegen. Infolge des erheblichen Zeitaufwandes bei der Versickerung und der Uebertragung des Wasserdruckes bis zur Tiefe des Filters treten diese Schwankungen mit einer Verzögerung und Abschwächung auf.

Besonders gleichmäßig ist der Verlauf bei Rohr 7, bei dem das Grundwasser etwa 13½ m tief unter dem Gelände in feinem Sand liegt (Abb. 2). Hier befindet sich als Filter einige Meter unter dem Grundwasserspiegel. Die Veränderungen des obersten Grundwasserspiegels werden daher Druckschwankungen im Rohr nur mit Verzögerung und Abschwächung hervorrufen können. Zuunterst in 18,0 bis 18,3 m unter Gelände hat die Bohrung Tonmergel angetroffen. Daher können sich Druckschwankungen, die der Wasserwerksbetrieb vielleicht in tieferen Schichten hervorruft, nicht sehr merklich bis zum Filter fortpflanzen. Es zeigt sich ein leichter gleichmäßiger Anstieg vom Februar 1916 bis September 1917, dann ein Abfall bis Januar 1920 und abermals ein leichtes Steigen. Bemerkenswert ist der verhältnismäßig hohe Stand des Wasserspiegels im trockenen Sommer 1921, dem aber ein tieferer Stand im nächsten Jahre gefolgt ist.

Bei Rohr 10 (Abb. 2) liegt der Grundwasserspiegel zwar tiefer, der Boden (Sand), in dem das Filter steht, ist aber nicht so feinkörnig, und infolgedessen entspricht der Wasserspiegel im Rohr besser dem oberen Grundwasserspiegel. Er zeigt daher die Schwankungen etwas schneller und deutlicher als bei Rohr 7, und es ist die größere Ergiebigkeit des Sickerwassers im Winter wenigstens angedeutet.

Einen ganz ähnlichen Verlauf zeigt Rohr 13, das am Grunde eines kleinen Talkessels liegt. Auffällig ist, daß sich auch Rohr 14 ebenso verhält, obwohl hier eine 0,80 m starke Geschiebemergelbank durchbohrt worden ist, die also augenscheinlich keinen Einfluß ausübt.

Das Rohr 18 (Abb. 6), das tieferes gespanntes Grundwasser angeschnitten hat, zeigt bei sonst ähnlichem Verlauf eine um einige Dezimeter stärkere Absenkung zu Beginn des Abflußjahres 1920. Augenscheinlich zeigt sich hier das letzte Ausklingen der Wirkung des rd. 1200 m entfernten Wasserwerks am Teufelssee.

Bei Rohr 29 (Abb. 2) liegt der Grundwasserspiegel ungewöhnlich tief (rd. 26 m unter Gelände). Die Schwankungen zeigen den für Gruppe 1 typischen Verlauf. Aehnlich lagen die Verhältnisse bei Rohr 30, das bereits 1919 beschädigt worden ist.

Rohr 37 (Abb. 4), bei dem der Grundwasserspiegel etwa 10 m unter Gelände liegt, zeigt einen ganz ähnlichen Verlauf mit leichten Anklängen an Gruppe 2.

Bei Rohr 38 (Abb. 2) an der Grenze des besiedelten Gebietes von Berlin-Grunewald sind anscheinend kleinere Messungsfehler unterlaufen. Im übrigen verhält es sich wie Rohr 7, was sich daraus erklärt, daß es in feinem Sande steht. Es werden also wohl auch hier die Schwankungen des oberen Grundwasserspiegels nur abgeschwächt und zögernd auf das untere Grundwasser übertragen.

Gruppe 2.

Die Wasserstandsschwankungen im Zuge der Seenkette und beim Pechsee.

Bei dem Wasser im Zuge der Grunewaldseen können die Niederschläge schneller und unmittelbarer auf die Wasserstände wirken als bei Gruppe 1. Beim offenen Wasser kommen dabei teils solche Niederschläge in Betracht, die unmittelbar auf die Wasserfläche fallen, teils solche, die aus der Nachbarschaft schnell oberirdisch zufließen. Beim Grundwasser der den Seen benachbarten Niederungen liegt der Wasserspiegel in geringerer Tiefe unter der Oberfläche und wird schneller vom Sickerwasser erreicht als im Gebiet des Höhendiluviums (Abb. 3).

Ein Sinken des Wasserspiegels erfolgt bei Gruppe 2 nicht nur wie bei Gruppe 1 infolge des unterirdischen Abfließens, sondern auch infolge der Verdunstung des Wassers, die bei den Seen unmittelbar von der Wasseroberfläche, beim Grundwasser der benachbarten Niederungen durch Vermittlung der Pflanzen erfolgt. Es ist daher zu erwarten, daß die Schwankungen des Wasserspiegels hier lebhafter vor sich gehen als bei Gruppe 1. Allerdings können die Unterschiede zwischen beiden Gruppen nicht sehr erheblich werden, da sich Gruppe 2 als schmale Zone durch Gruppe 1 hindurchzieht und also ein gegenseitiger Ausgleich bis zu einem gewissen Grade eintreten wird, besonders in den tieferen Schichten des Grundwassers, in die die Rohre meist hinabreichen. Die Schwankungen des obersten Grundwasserspiegels dürften lebhafter sein (Abb. 10).

Betrachten wir zunächst den Hundekehlensee (Abb. 3), der durch Zuführung von Abwässern beeinflußt wird, so zeigt sich 1917 und 1918 die typische Schwankung vom Winter zum Sommer mit etwa 40 cm. 1919 blieb der Winteranstieg aus, nicht aber der Abfall im Sommer. 1920 war es umgekehrt; da trat zwar der Anstieg im Winter ein, nicht aber der Abfall im Sommer. 1921 und 1922 zeigten wieder annähernd die typische Schwankung.

Nur wenige Meter vom Ufer des Hundekehlensees entfernt steckt das Rohr 17 im Sand (Abb. 3). Das Filter reicht von 6 bis 7 m Tiefe unter Oberkante Rohr. Im Jahre 1918 war das Rohr beschädigt worden. Als es 1920 gezogen wurde, war das Filter vollständig mit Karbonaten überzogen und ganz wasserdicht. Es wurde dann mit Salzsäure gereinigt. Der Grundwasserspiegel liegt etwa 2 m unter der Geländeoberfläche und erheblich unter dem Seespiegel. Der Verlauf der Schwankung 1921/22 ähnelt sehr dem bei Gruppe 1 und läßt keine Beeinflussung durch den Seespiegel erkennen. Es scheint also, daß hier eine sehr beträchtliche Abdichtung des Seebodens eingetreten ist.

Rohr 35 (Abb. 3) steht im Sand nahe dem Rande des Hochmoors nördlich vom Grunewaldsee. Der Grundwasserspiegel liegt hier 2½ m unter der Geländeoberfläche, die Bohrung reicht aber bis zu 6 m Tiefe und gibt also nicht unmittelbar die Schwankungen des oberen Grundwasserspiegels an. Es ist daher erklärlich, daß der Verlauf der Wasserstände in Rohr 35 noch dem der Gruppe 1 entspricht. Die Schwankungen des obersten Grundwasserspiegels

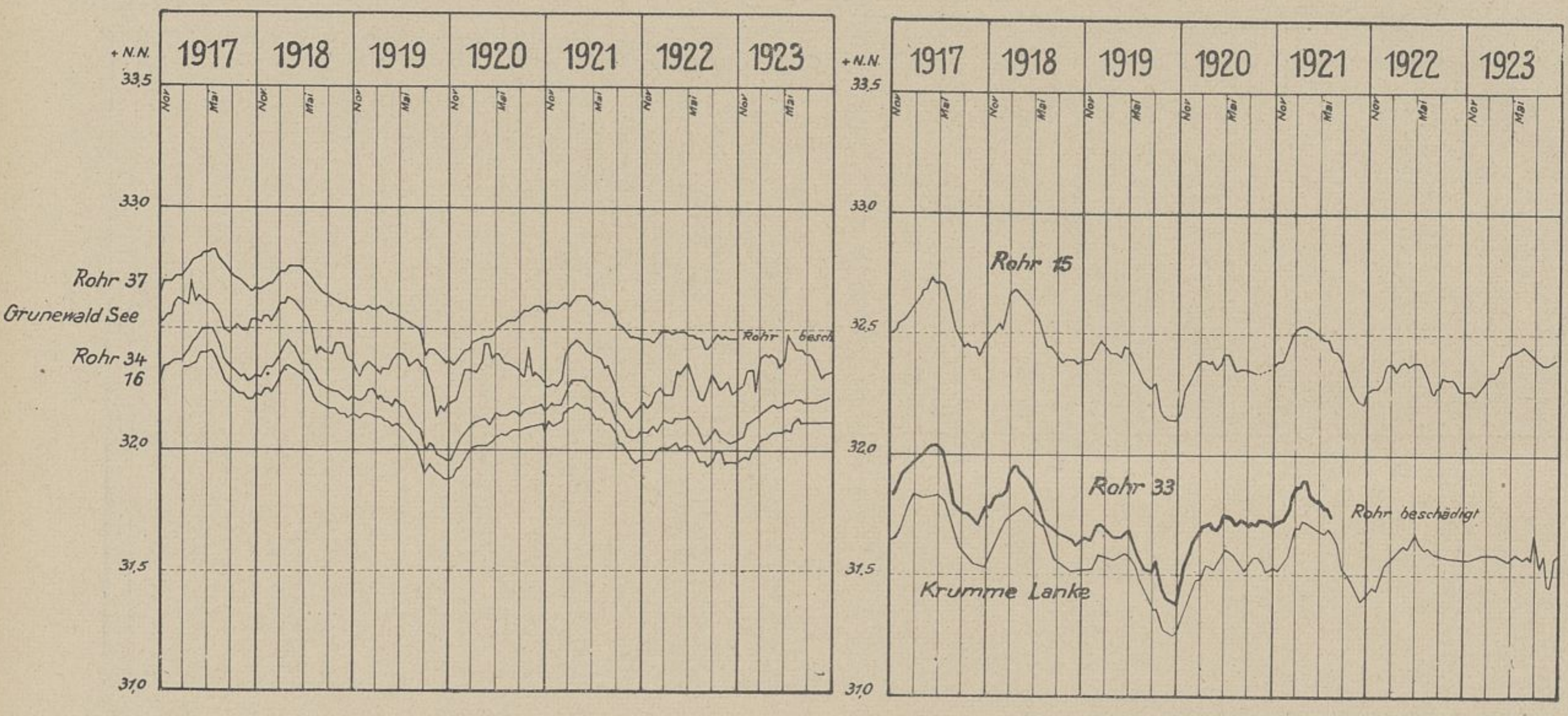


Abb. 4. Grundwasser im Zuge der Grunewaldseen.

Abb. 5. Grundwasser im Zuge der Grunewaldseen.

im benachbarten Moorboden verlaufen jedenfalls anders, sind aber im Grunewalde nicht gemessen worden, wohl aber in Berlin-Zehlendorf (Abb. 10).

Beim Grunewaldsee (Abb. 4) sind die Schwankungen ganz ähnlich wie beim Hundekehlensee, nur etwas gedämpfter. Rohr 37 (Abb. 4), das 320 m vom See entfernt am Wege vom Jagdschloß nach Dahlem liegt, hat im Sand eine Tiefe von rund 13,5 m erreicht. Der Grundwasserspiegel folgt hier im wesentlichen noch dem Typus der Gruppe 1 und wird durch die Nähe der Niederung nur ganz wenig beeinflußt.

Rohr 16 (Abb. 4) im Sand unweit Paulsborn, 140 m vom Seeufer, hat in grobkörnigen Böden eine Tiefe von über 8 m erreicht. Der Wasserspiegel liegt rund 4 m unter der Geländeoberfläche und etwas tiefer als der Seespiegel. Der Schwankungsverlauf war beim Wasserspiegel im Rohr ähnlich wie beim Seespiegel, aber etwas ausgeglichener, was besonders im Jahre 1920 hervortritt.

Rohr 34 (Abb. 4) steht am Rande des Moores zwischen Riemeister- und Grunewaldsee. Das Filter befindet sich zwischen 5 und 6 m Tiefe in Sand und Kies; in 1,0 bis 1,6 m Tiefe liegt sandiger Ton. Der Verlauf der Schwankungen ist ganz wie bei Rohr 16, so daß man an eine unterirdische Verbindung zwischen beiden Punkten denken könnte. Doch läßt sich die Uebereinstimmung auch durch gleiche Einwirkung der Witterung an den beiden Stellen erklären.

Rohr 15 (Abb. 5) beim Riemeistersee steht im Moor, das hier 2,3 m stark ist. Die Bohrung ist aber 7 m tief und reicht bis etwa 5 m unter den Wasserspiegel; das Filter steht in feinem, grauen Sande. Versuche Ende Oktober 1920 ergaben, daß die Verbindung zwischen dem Wasser im Rohr und dem Grundwasser recht gut ist. Die Schwankungen des Wasserspiegels sind lebhafter als beim Grunewaldsee und ähneln denjenigen beim Hundekehlensee. Ganz ähnlich sind sie auch beim Rohr 33 (Abb. 5), das im Sande versteckt, nicht weit vom Nordende der Krummen Lanke liegt. Der Spiegel dieses Sees (Abb. 5) geht mit demjenigen des benachbarten Grundwassers auf und ab.

Rohr 19 beim Pechsee ist nur 7 m tief und hat von 2 bis 5 m Tiefe mittel- bis grobkörnigen Sand durchsunken, in dem der Grundwasserspiegel liegt. Der Wasserstand im Rohr muß daher demjenigen des obersten Grundwasserspiegels gut folgen. Der Schwankungsverlauf entspricht demjenigen bei den übrigen Rohren der Gruppe 2.

Gruppe 3.

Das Grundwasser im besiedelten Gebiet von Berlin-Grunewald bietet ein geringeres wissenschaftliches Interesse und soll daher nicht näher behandelt werden.

Gruppe 4.
Das Grundwasser beim Teufelssee.

Das Wasserwerk am Teufelssee, dessen Brunnen sich über eine Strecke von 312 m Länge verteilen, hat die in Abb. 6 von oben nach unten aufgetragenen Wassermengen gefördert. Die Tiefe der Brunnen wechselt zwischen rund 22 m und 42 m. Oberhalb der Schichten von scharfem Sand und Kies, in die die Filter eingebaut sind, liegen Fetzen von „Ton", die aber den Zusammenhang zwischen dem oberen und dem unteren Grundwasser nicht aufzuheben vermögen. Vgl. Tafel 2.

Die in geringer Entfernung von den Wasserfassungen angesetzte 9 m tiefe Bohrung 27 hat durchlässige Schichten angeschnitten, die offenbar mit den vom Wasserwerk ausgenutzten in enger hydraulischer Verbindung stehen. Wie die Zeichnung (Abb. 6) zeigt, finden sich die engsten Beziehungen zwischen der Fördermenge des Werkes und den Schwankungen in Rohr 27, und zwar entspricht ganz ungefähr einer Förderungsänderung von 100 000 cbm/Monat eine Wasserstandsänderung von 1 m.

Rohr 24 steht ebenfalls dicht beim Wasserwerk und zeigt ähnliche aber gedämpfte Schwankungen wie 27. Es ist das wohl so zu erklären, daß die 12,9 m tiefe Bohrung bei 12,75 m Tiefe unter Gelände auf Geschiebemergel gestoßen ist, der die hydraulische Verbindung mit den Brunnen des Wasserwerkes beeinträchtigt.

Die Wasserstände in dem 10 m tiefen Rohr 23 am Südende des Teufelssees verlaufen fast genau wie diejenigen von Rohr 24 und konnten daher in Abb. 6 fortgelassen werden.

Durch die Grundwasserabsenkung würde der Teufelssee längst ausgetrocknet sein, wenn ihm nicht vom Wasserwerk aus erhebliche Mengen Abwasser zugeführt würden, die zwischen rund 5000 und 20 000 cbm/Monat geschwankt haben. Die Seefläche beträgt nach dem Meßtischblatt ungefähr 26 000 qm. In den verdunstungsarmen Wintermonaten hat die künstliche Wasserzufuhr im allgemeinen ein geringfügiges Ansteigen des Wasserspiegels bewirkt, in den Sommermonaten ist dagegen meist ein geringes Absinken eingetreten. Zahlenmäßige Berechnungen über den Wasserhaushalt des Teufelssees bleiben einer späteren Untersuchung über den Wasserhaushalt einiger märkischer Seen vorbehalten.

Das 10 m tiefe Rohr 22 (Abb. 6) am Teufelssee steht in ähnlichen Bodenschichten wie Rohr 23 (vergl. vorn S. 2), der Einfluß des Wasserwerks ist hier noch deutlich erkennbar, aber im Vergleich zu Rohr 24 erheblich abgeschwächt.

Bei dem jetzt verstopften Rohr 21 an der Wasserscheide zwischen dem Senkungstrichter und der Havel ähnelt der Wasserstandsverlauf bereits sehr demjenigen bei Gruppe 2.. Doch ist hier ein Einfluß des Wasserwerkes wohl auch noch wahrnehmbar. Die Bohrung an dieser Stelle hatte zuunterst bei 8,5 m unter Gelände Geschiebemergel erreicht. Beobachtet wurde also eine obere Grundwasserschicht.

Bei Rohr 19 am Pechsee (Abb. 6) entspricht der Verlauf dem Typus von Gruppe 2, und eine Einwirkung des Wasserwerkes läßt sich nicht mehr sicher nachweisen.

Die zwischen dem Teufelssee und dem Hundekehlensee angesetzte Bohrung 25 hat unter einer 1,35 m starken Geschiebemergelbank von 21,9 bis 28,5 m unter Gelände im Sande unteres Grundwasser angetroffen, dessen Spiegel aber so tief liegt, daß er meist nicht gespannt ist. Die Schwankungen ließen hier den Einfluß des Wasserwerkes noch deutlich erkennen.

Sehr tief unter Gelände (mehr als 26 m) liegt der Grundwasserspiegel bei Rohr 18 (Abb. 6), das bis 31,5 m unter Gelände hinabreicht. Der Schwankungsverlauf entspricht hier im allgemeinen dem

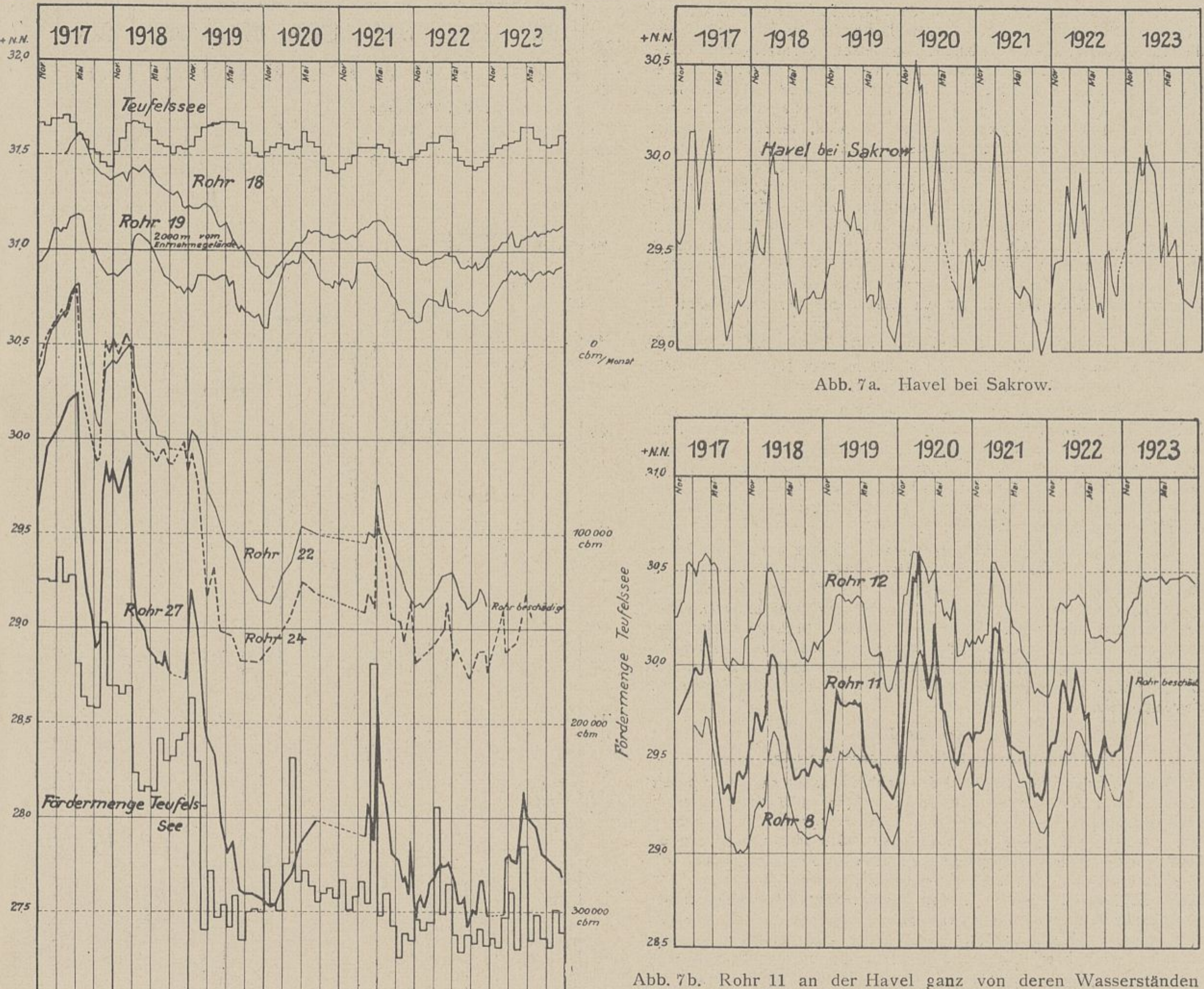


Abb. 7a. Havel bei Sakrow.

Abb. 7b. Rohr 11 an der Havel ganz von deren Wasserständen abhängig. Bei Rohr 12, 200 m von der Havel ist deren Einwirkung abgeschwächt. Der Wasserspiegel im Senkungstrichter des Wasserwerks Beelitzhof bei Rohr 8 unterliegt auch einer starken Einwirkung durch die Havel.

Abb. 6. Förderung des Wasserwerks Teufelssee und davon abhängige Wasserstandsschwankungen in Rohr 27, Abnahme der Einwirkung des Wasserwerks mit der Entfernung, bei Rohr 24 Geschiebemergel zu unterst angetroffen.
Oben: Künstlicher durch Wasserzufuhr gehaltener Spiegel des Teufelssees.

der Gruppe 1. Doch ist seit 1919 hier eine stärkere Absenkung eingetreten als bei anderen Stellen dieser Gruppe. Das ist wohl so zu erklären, daß die anhaltende Verstärkung der Förderung des Wasserwerks ihren Einfluß bis hierher erstreckt hat.

Den durch den Wasserwerksbetrieb vom Grundwasser entleerten Bodenraum kann man auf rund 10 Millionen cbm veranschlagen; die Wassermenge, die aus diesem Raum entzogen worden ist, beträgt rund 2 bis 3 Millionen cbm, entspricht also etwa dem Betrag einer mittleren Jahresförderung.

Das Wasserwerk Teufelssee unterscheidet sich von der Mehrzahl der Groß-Berliner Wasserwerke dadurch, daß die Förderung mit 2 bis 3 Millionen cbm/Jahr verhältnismäßig klein ist, und daß es in größerer Entfernung von einem Fluß liegt, aus einem solchen also kein Wasser ableiten kann und nur auf Grundwasserzuflüsse angewiesen ist. Aehnliche Verhältnisse wie beim Wasserwerk Teufelssee liegen aber nicht selten bei Wasserwerken vor, die für mittlere Stände sowie für ländliche Sammelversorgungen zu errichten sind, und für solche Verhältnisse bietet das Werk ein lehrrreiches Beispiel. Die Wassermengen, die im Teufelssee versickern und zur Ergänzung des Grundwassers dienen, spielen nur eine untergeordnete Rolle. Aus dem Grundwasserstrom, der von Osten her nach Westen fließt, schneidet das Wasserwerk einen mindestens 3 km breiten Streifen heraus, dessen unterirdischen Abfluß es abfängt. Wird im Sommer die Förderung vorübergehend verstärkt, so wird eine Wassermenge, die etwa dem Mehrbetrag der verstärkten Förderung gegenüber der Durchschnittsförderung entspricht, dem im Boden aufgespeicherten Grundwasservorrat in der Nähe des Wasserwerkes entnommen. Umgekehrt wird bei Nachlassen der Förderung der Grundwasservorrat im Senkungstrichter wieder aufgefüllt. Tritt dagegen eine dauernde, sich über Jahre erstreckende Vermehrung der Förderung ein, so bleibt die Wirkung nicht auf die Nähe des Werkes beschränkt, sondern es werden die Grenzen des Zuflußgebietes hinausgeschoben. Die Wassermengen, die der Havel entzogen werden, hängen also von der durchschnittlichen Förderung mehrjähriger Zeiträume ab.

Diese Schlußfolgerungen dürfen aber durchaus nicht etwa auf alle Wasserwerke übertragen werden; denn es gibt auch solche Wasserwerke (und zwar gerade unter den großen), bei denen die jährlichen Schwankungen der Förderung auf einen benachbarten Fluß beträchtlich zurückwirken.

Der Wasserwerksbetrieb beruht auf den Grundwasserzuflüssen, die den versickerten Niederschlägen entstammen. Der Grundwasservorrat steuert, soweit er nicht lediglich als Ausgleichsbecken dient, nur einen einmaligen Beitrag bei, der in der gesamten Zeitdauer seit Betriebseröffnung den Betrag einer einzigen mittleren Jahresförderung nicht überstiegen hat. Nimmt die Jahresförderung des Werkes nicht mehr zu, so hören diese Beiträge aus dem Grundwasservorrat alsbald ganz auf.

Gruppe 5.

Einfluß der Havel auf das Grundwasser.

(Abb. 7a und 7b.)

Die Wasserstände der Havel sind durch die Pegelablesungen in Sakrow und am Pichelsdorfer Gemünd bekannt. Die Schwankungen

der Havel sind in Abb. 7a nach den täglichen Beobachtungen am Pegel zu Sakrow dargestellt. Am Havelufer im Blattgebiet sind die Havelwasserstände höchstens um einen geringfügigen Betrag von einigen Zentimetern höher. Die Schwankungen des Havelwasserspiegels sind sehr viel lebhafter als die natürlichen Grundwasserstandsschwankungen der Gruppen 1 und 2. Auch fallen die Höchst- und Tiefststände der Havel und des Grundwassers der Gruppen 1 und 2 zeitlich nicht zusammen. Z. B. zeigt die Havel im Januar 1917 eine Spitze, die beim Grundwasser der Gruppen 1 und 2 fehlt. Die sommerlichen Tiefstände treten bei der Havel erheblich früher ein als beim Grundwasser der Gruppen 1 und 2. Die 7,75 m tiefe Bohrung 11 (Abb. 7b) ist dicht am Ufer der Havel angesetzt. Die Schwankungen verlaufen hier ganz anders als bei den Gruppen 1 und 2 und folgen mit einer geringen Abschwächung dem Havelwasserstand (Abb. 7a), ein Beweis dafür, daß der Sandboden des Flußufers hier eine erhebliche Durchlässigkeit besitzt. Aehnlich lagen die Verhältnisse auch bei dem jetzt beschädigten Rohr 20.

Rohr 12 (Abb. 7b) steht etwa 200 m vom Havelufer landeinwärts in Sand und reicht 6½ m tief unter Gelände.

Auch bei diesem Rohr ist die Einwirkung der Havel noch ganz deutlich ausgeprägt. Insbesondere pflanzt sich der Wasserdruck bei höheren Wasserständen schnell bis hierher fort. Im Herbst 1921 verzögerte sich der Tiefststand jedoch erheblich gegenüber dem der Havel. Es scheint, daß sich der Einfluß der Havelschwankungen auf die Grundwasserschwankungen etwa 500 m weit landeinwärts erstreckt (Abb. 1).

Da der Havelspiegel stärker schwankt als der natürliche Grundwasserspiegel, so nimmt bei Niedrigwasser das Gefälle des der Havel zufließenden Grundwassers zu, bei Hochwasser ab. Die Strömungsquerschnitte werden aber bei Niedrigwasser verkleinert, bei höherem Wasserstand vergrößert. Beide Vorgänge dürften sich annähernd aufheben und es dürfte daher die in die Havel ausfließende Grundwassermenge ziemlich gleichmäßig sein, abgesehen von vorübergehenden Verstärkungen des Zuflusses bei schnellem Sinken des Havelspiegels.

Gruppe 6.

Das Grundwasser beim Schlachtensee (Abb. 8).

Nachdem der Wasserspiegel des Schlachtensees nach dem bereits vorher erwähnten starken Absinken im Jahre 1915 wieder auf die vertragsmäßige Höhe von 31,60 m gebracht worden war, hielt er sich ungefähr auf dieser bis in das Jahr 1919 hinein, während der benachbarte Grundwasserspiegel sich senkte. Auffällig ist, daß sich eine Unterbrechung der künstlichen Wasserführung im Februar 1917 (siehe Zahlentafel 2, S. 6) in den Wasserstandsaufzeichnungen des Seespiegels nicht wesentlich bemerkbar macht. Vielleicht sind aber diese Pegel während des strengen Frostes nicht aufgeeist worden. Ob diese Unterbrechung der Wasserzufuhr auf den benachbarten Grundwasserstand Einfluß hatte, läßt sich nicht sicher sagen, da die Beobachtungen erst zum Teil eingesetzt hatten, auch die Grundwasserstände stark von den Fördermengen des Werkes Beelitzhof abhingen.

In den Jahren 1917 und 1918 wurde die vertragsmäßige Höhe des Seespiegels nur durch Vermehrung der zugeführten Wassermasse erreicht. Trotzdem sank der benachbarte Grundwasserspiegel weiter. Im Sommer 1919 reichten die dem See zugeführten Wassermassen nicht mehr aus, und es trat ein Sinken des Seespiegels ein, das im August durch verstärkte Wasserzufuhr vorübergehend unterbrochen wurde. Mit dem Abflußjahr 1920 setzte zunächst ein kleiner Anstieg des Seespiegels ein, bis ihn eine dreimonatliche Unterbrechung der Wasserzufuhr zu einem Sinken bis auf N. N. + 31,05 m veranlaßte. Währenddessen stieg der Grundwasserspiegel. Mit Hilfe einer starken Wasserzufuhr im Mai 1920 wurde der Seespiegel dann wieder auf die vertragsmäßige Höhe gebracht, die er aber in der Folgezeit mehrfach unterschritt. So fiel er im Winter 1923 infolge Herabgehens der zugeführten Wassermassen auf nur 231 600 cbm um nahezu ½ m. Im Mai und Juli wurde dann der Spiegel durch stärkere Wassergaben vorübergehend wieder gehoben. Die Abnahme der zugeführten Wassermasse in den letzten Jahren kann also nicht als Beweis für eine zunehmende Abdichtung des Seebodens angesehen werden, sondern hängt damit zusammen, daß die vertragsmäßigen Wasserstände nicht immer eingehalten worden sind. Eingehendere Darstellungen des Wasserhaushalts des Schlachtensees und einiger anderer märkischer Seen bleiben einer späteren Arbeit vorbehalten.

Das 6 m tiefe Rohr 32 (Abb. 8), das rund 10 m vom Seeufer entfernt im Sande steht, zeigt ähnliche Schwankungen wie das Rohr 33 an der Krummen Lanke. Der Abstand vom Seespiegel bis zum Grundwasserspiegel, der anfänglich bloß ½ m betrug, hat sich bis Ende 1919 vergrößert. 1920 ist das Rohr beschädigt worden. Das 6 m tiefe Rohr 31 (Abb. 10) steht 35 bis 40 m vom Seeufer im Sande. Die Schwankungen sind hier lebhafter als bei 32, offenbar infolge Einwirkung des Wasserwerkes Beelitzhof.

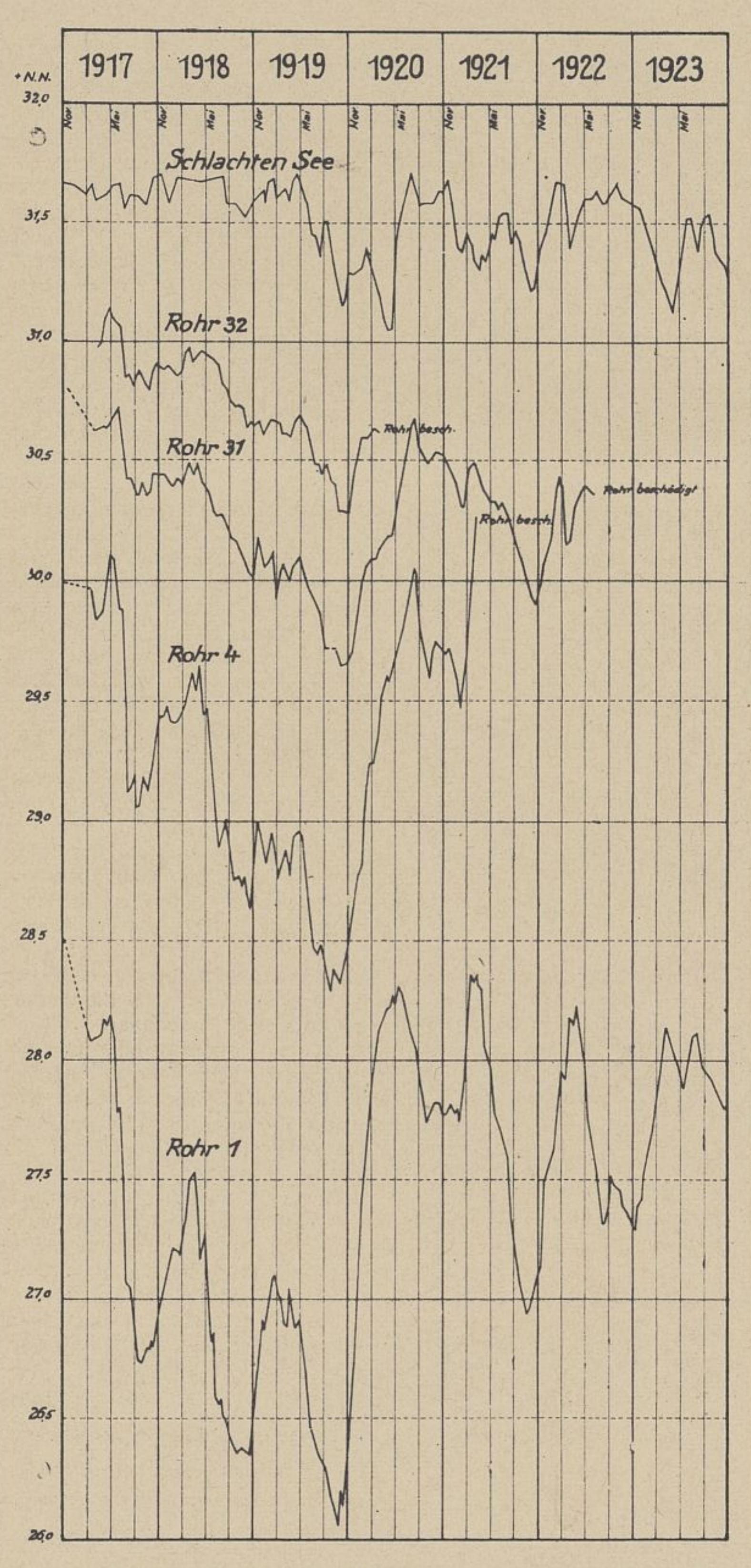


Abb. 8. In Rohr 32, 31 und 4 Grundwasser neben dem künstlich gehaltenen Schlachtensee. Rohr 1 beim Rathaus Nikolassee zeigt stärkere Einwirkungen des Wasserwerkbetriebes von Beelitzhof.

Das 9 m tiefe Rohr 4 (Abb. 8) am Südende des Schlachtensees, rund 25 m vom Ufer, unterliegt stark dem Einfluß des Wasserwerkes. Der Abstand zwischen Seespiegel und Grundwasserspiegel ist hier von 1½ m im Jahre 1917 auf mehr als 2½ m im Jahre 1919 gestiegen. Das Jahr 1920 brachte dann einen kräftigen Anstieg des Grundwassers.

Zweifellos hat die Abwanderung von Wasser aus dem Schlachtensee in den Untergrund zu einer Höherhaltung der Grundwasserstände der Umgebung geführt. Sie konnte aber die alljährlich aus dem Grundwasser durch das Wasserwerk Beelitzhof entzogenen Wassermengen bei weitem nicht ersetzen und ihr Einfluß kreuzt sich mit dem Einfluß der Schwankungen in der Förderung des Wasserwerkes.

Gruppe 7.

Das Grundwasser beim Wasserwerk Beelitzhof.

Die Wasserfassungen erstrecken sich vom Beobachtungsrohr 2 an der Rehwiese in Nikolassee nach Beelitzhof, weiterhin am Havel-

ufer entlang über den Strand des Freibades bis zur Gr. Steinlanke. Die natürlichen Grundwasserstände würden hier ungefähr ebenso hoch über N. N. liegen wie die in Abb.7b dargestellten bei Rohr 11 (rd. N. N. +29,5 m). Durch die große Zutageförderung unterirdischen Wassers ist aber eine gewaltige Absenkung eingetreten. Da Einzelheiten über die Inanspruchnahme der einzelnen Teile der Brunnenreihen mir nicht bekannt sind, können die Beziehungen zwischen Fördermenge und Grundwasserstand nicht so genau verfolgt werden wie beim Wasserwerk Teufelssee, sondern ich will mich in der Hauptsache auf die Wiedergabe der beobachteten Schwankungen beschränken, zumal die Anzahl der Beobachtungsrohre in der Umgebung der Wasserfassungen so gering ist, daß die Gestalt des Senkungstrichters im einzelnen nicht festgestellt werden kann.

Nur 30 m von der Brunnenreihe und 65 m vom Ufer der Havel entfernt, steht das 10,5 m tiefe Rohr 6 in grobem Sand und Kies. Der Wasserstand schwankt hier zwischen 28,72 und 23 m über N. N., also außerordentlich stark. Der Unterschied zwischen dem höchsten Stande im Winter und dem tiefsten Stande im Sommer beträgt mehrfach rund 5 m. Auffallend gering war die Absenkung im Januar 1920. Eine Abbildung hierzu ist bereits früher gegeben (29. Abb. 14).

Bei Rohr 2 an der Rehwiese ist die Beeinflussung durch den Wasserwerksbetrieb noch sehr deutlich, doch ist das Ausmaß der Absenkung und der Schwankungen bei weitem nicht so groß wie bei Rohr 6. Es ist mir nicht bekannt, ob die in der Nähe von Rohr 2 stehenden Brunnen schwächer beansprucht werden. Nach den geologischen Verhältnissen ist es auch sehr wohl möglich, daß unter dem Sand, in den das Beobachtungsrohr bis zur Tiefe von 8 m u. G. hinabreicht, eine schwerdurchlässige Schicht liegt, die die hydraulische Verbindung zwischen dem oberen und dem unteren Grundwasser erschwert und bewirkt, daß die Druckschwankungen des unteren Grundwassers nur in gedämpfter Form auf das obere übertragen werden.

Bei Rohr 1 (Abb. 8) am Rathaus Nikolassee steht das Filter in einer 2½ m mächtigen Schicht von Sand, die nach oben von einer 2 m mächtigen Geschiebemergelbank, nach unten von dunklem, fetten Ton begrenzt wird. Die Absenkung ist hier stärker als bei Rohr 2.

Bei dem schon erwähnten Rohr 4 am Schlachtensee (Abb. 8), das 1100 m vom Wasserwerk entfernt steht, ist die Einwirkung des Wasserwerksbetriebs immer noch deutlich erkennbar.

Rohr 8 (Abb. 7b) steh trund 160 m vom Havelufer und der Brunnenreihe des Wasserwerks im Sand. Die Bohrung hat hier zuunterst von 10 bis 12,5 m Tiefe schwachkiesigen Sand erreicht. Der Grundwasserspiegel liegt hier bereits unter dem Havelspiegel. Der Verlauf der Schwankungen ähnelt sehr demjenigen bei der Havel.

Offenbar bestehen also enge Beziehungen zwischen den Wasserständen der Havel und den Grundwasserständen im Senkungstrichter. Zum Teil könnte man dies darauf zurückführen, daß trockene Witterung, die eine Steigerung der Förderung herbeiführt, gleichzeitig auch zu einem Sinken der Flußwasserstände führt. Es ist aber vor allem anzunehmen, daß bei steigenden Wasserständen der Havel der Senkungstrichter durch vermehrtes Eindringen von Havelwasser aufgefüllt wird, während umgekehrt bei fallendem Havelwasserstand der Zufluß von Havelwasser in den Senkungstrichter geringer wird. Sicheres über diese Beziehungen ließe sich aber nur ermitteln, wenn uns alle Einzelheiten in der Beanspruchung der Wasserwerksbrunnen bekannt wären.

VIII. Der Witterungsverlauf und das Grundwasser.

Die Beziehungen zwischen dem Witterungsverlauf und dem Grundwasserstand werden in so weitgehendem Maße durch den geologischen Bau und die Vorflutverhältnisse beeinflußt, daß es verfehlt ist, sie einseitig vom meteorologischen Standpunkt aus zu betrachten. Der vorliegende Abschnitt bildet daher kein in sich geschlossenes Ganze, sondern kann nur im Zusammenhang mit den vorhergehenden richtig verstanden werden. Auch ist das untersuchte Gebiet so klein und so wenig in sich abgeschlossen, daß es unmöglich ist, hier genauere gesetzmäßige Beziehungen zwischen Witterung und Grundwasserstand ableiten zu wollen. Einen genaueren Einblick in diese Beziehungen haben uns Untersuchungen an einer großen Zahl von Beobachtungsstellen in verschiedenen Teilen Norddeutschlands gewährt, und die so gewonnenen Kenntnisse und Erfahrungen ermöglichen es, sie auch im Grunewalde einigermaßen herauszuschälen. Einige dieser Untersuchungen aus der Gegend von Beelitz und Potsdam habe ich bereits veröffentlicht (37).

Zur Beurteilung der Witterungseinflüsse im Grunewalde sind Beobachtungen der in seiner Nachbarschaft liegenden Stationen Potsdam, Dahlem, Westend und Pichelswerder herangezogen. Trotz der geringen Größe des Untersuchungsgebietes zeigen die meteorologischen Erscheinungen in seinen verschiedenen Teilen schon wesentliche Unterschiede. So hat die im Tale in nur 30 m über N. N. liegende Meßstelle Pichelswerder geringere Winterniederschläge als die höher gelegenen Regenmeßstellen (Dahlem, Westend); auch im Sommer sind die Niederschläge in Pichelswerder häufig geringer als in Westend und Dahlem; doch ist der Unterschied im Sommer nicht so ausgeprägt wie im Winter. Am besten geeignet für den vorliegenden Zweck ist wohl wegen ihrer Lage unweit der Mitte des Grunewaldes und auch ihrer dem Waldgebiet annähernd entsprechenden Höhe über N. N. die meteorologische Station II. Ordnung in der Lehr- und Forschungsanstalt für Gartenbau in Dahlem. In der untenstehenden Zahlentafel sind von dieser Stelle die für den Grundwasserstand wichtigsten meteorologischen Werte für die einzelnen Monate sowie das Winter- und Sommerhalbjahr und das Abflußjahr für die Zeit 1917/1923 (Mittelbildungen für 1910/1923) wiedergegeben.

Dabei konnten die Niederschläge N, die relative Feuchtigkeit der Luft r, die absolute Feuchtigkeit der Luft (Dampfdruck) d und die Temperatur T unmittelbar aus den meteorologischen Zahlentafeln entnommen werden, während der Sättigungsfehlbetrag der Luft u nach dem in Abb. 9 veranschaulichten Schnellverfahren hier bestimmt worden ist. Hierzu ist von der Beziehung $\frac{u}{d} = \frac{100-r}{r}$ ausgegangen worden. Bei einer bestimmten relativen Feuchtigkeit ist $\frac{u}{d}$ konstant, bei r = 90% ist z. B. $\frac{u}{d} = \frac{10}{90}$. Dementsprechend

Zahlentafel 3.

Witterung in Dahlem. N = Niederschlagsumme, r = relative Feuchtigkeit der Luft, d = Dampfdruck (absolute Luftfeuchtigkeit), u = Sättigungsfehlbetrag aus $d\frac{100-r}{r}$ bestimmt, T = Temperatur.

Jahr	November					Dezember					Januar					Februar				
	N	r	d	u	T	N	r	d	u	T	N	r	d	u	T	N	r	d	u	T
1917	36	85	5,6	1,0	4,9	79	91	5,0	0,5	2,5	89	87	3,5	0,5	–2,4	15	87	3,3	0,5	–3,9
1918	38	89	6,2	0,8	5,6	56	92	4,0	0,4	–1,2	110	95	4,8	0,3	0,5	47	81	4,1	1,0	1,7
1919	16	89	5,3	0,7	3,1	87	92	5,5	0,5	3,5	25	86	4.4	0.7	0,8	16	86	4,2	0,7	0.1
1920	84	89	4,0	0,5	–0,6	86	88	4,3	0.6	0,2	50	86	4.6	0.7	1,8	30	82	4.7	1.0	3.1
1921	10	79	4,0	1,1	0.8	43	90	4,3	0,5	–0,1	99	85	5,5	1.0	4,4	34	80	4,2	1,0	1,5
1922	40	86	4,2	0.7	0.3	66	84	4,3	0,8	0.6	50	83	3,3	0,7	–3,6	22	81	3,7	0,9	–1,6
1923	64	86	4,9	0.8	2,8	60	89	5,0	0.6	2,6	48	84	4,6	0,2	2,5	34	76	3,8	1,2	–0,1
M 1910/1923	44	86	5,1	0,8	2,9	67	88	4,8	0,7	1,9	60	86	4,2	0,7	0,2	31	82	4,2	1,0	1,0

Jahr	März					April					Mai				
	N	r	d	u	T	N	r	d	u	T	N	r	d	u	T
1917	36	81	3,8	0,9	–0,3	29	72	4.8	1,9	5 4	11	53	7.3	6,4	16,0
1918	10	75	5,1	1,7	4,4	42	73	7,1	2,6	11.3	10	55	7,2	5 6	15 4
1919	46	78	4,7	1.3	3 2	57	75	5.5	1.8	6,5	20	65	6,7	3,6	11.9
1920	14	74	5,5	1,9	7,0	99	76	7,3	2 3	10 8	27	69	8,9	4,0	14,8
1921	6	67	4.8	2,4	6.6	32	65	5 5	3.0	9.1	95	62	8.0	4 9	15,4
1922	38	75	4 6	1,5	3,8	55	74	5,3	1.9	6.0	52	62	7 5	4,6	14.1
1923	15	76	5.0	1,6	5.6	60	65	5,0	2,7	7,3	67	74	8.0	2.8	12,0
M 1910/1923	36	77	4,0	1,5	4,3	41	69	4,7	2,5	8,4	43	63	7,4	4,4	13,8

Jahr	Juni					Juli					August					September				
	N	r	d	u	T	N	r	d	u	T	N	r	d	u	T	N	r	d	u	T
1917	23	53	9,6	8.5	21,0	53	65	10,3	5.6	18,9	58	72	11,1	4,3	18.2	19	73	9.2	3.4	15,4
1918	71	67	7,9	3,9	13 9	69	73	10,8	4,0	17,6	81	82	11,4	2.5	16,3	62	79	9.3	2.5	13.5
1919	73	69	9 0	4,0	15.7	42	?	fehlt			36	68	9 4	4.4	16,4	16	71	9,3	3 8	15,6
1920	49	69	9.1	4,1	15.4	77	69	11.4	5,1	19.0	94	76	10.4	3.3	16,2	45	79	9.2	2.4	13.6
1921	82	68	8.8	4,1	14.9	21	58	9.6	6,9	19.3	62	60	9.5	6,3	18,8	40	72	8,4	3 3	13,6
1922	35	66	9.0	4,6	16,3	195	75	10,5	3,5	16,5	50	75	9.9	3.3	15,6	70	79	8,3	2.2	11,8
1923	76	76	7,9	2,5	11,8	87	68	11,2	5,3	19,1	35	71	9.6	3,9	15,7	24	75	8,8	2,9	13,7
M 1910/1923	57	66	9,0	4,8	16,1	70	68	10,6	5,0	18,3	62	72	10,3	4,0	15,9	41	76	8,7	2,8	13,3

Jahr	Oktober					Winter					Sommer					Jahr				
	N	r	d	u	T	N (Summe)	r (Mittel)	d (Mittel)	u (Mittel)	T (Mittel)	N (Summe)	r (Mittel)	d (Mittel)	u (Mittel)	T (Mittel)	N (Summe)	r (Mittel)	d (Mittel)	u (Mittel)	T (Mittel)
1917	92	85	7,0	1,2	8 2	284	84	4.3	0.9	1.0	256	67	9 1	4 9	16,2	540	75	6,7	2.9	8 6
1918	40	85	7.4	1,3	8,9	303	84	5.2	1.1	3 7	333	74	9,0	3,3	14.3	636	79	7,1	2,2	9.0
1919	60	84	6 6	1,2	7.1	247	84	4,9	0,9	2,9	247	71	8,2	3 4	13,3	494	78	6,4	2,1	7,6
1920	3	73	5 6	2,1	6,6	363	82	5.1	1,1	3,7	295	72	9 1	3.5	14,3	658	77	7,1	2.3	9.0
1921	62	80	7.9	2.0	10,8	224	78	4,7	1,5	3,7	362	67	8.7	4 6	15,5	586	72	6,7	3.0	9 6
1922	26	79	5,3	1,4	5.1	271	80	4,2	1,1	0,9	428	73	8.3	3,3	13 2	699	77	6.3	2,2	7,5
1923	69	82	7,9	1,7	10,5	281	79	4,7	1,3	3,4	358	74	8,9	3 2	13.8	639	77	6.8	2,2	8,6
M 1910/1923	40	82	6,9	1,5	8,2	279	81	4,6	1,2	3,1	313	71	8,8	3,8	14,3	592	76	6,7	2,5	8,7

ist durch den Nullpunkt eines Koordinatensystems eine Gerade so gezogen worden, daß die Ordinate eines Punktes auf dieser Geraden zur Abszisse sich verhällt wie $\frac{10}{90}$. Trägt man nun die Werte von d als Abszissen auf, so kann man die Werte von u als Ordinaten ablesen. In der gleichen Weise lassen sich Linien für alle anderen Werte der relativen Feuchtigkeit zeichnen und die Bestimmung von u aus d und r wird auf diese Weise viel schneller bewirkt als mit dem Rechenschieber.

Außerdem sind in der Figur noch Linien gezeichnet, die die Achsen unter 45° schneiden. Für einen Punkt auf einer solchen Linie gilt die Gleichung $\frac{d}{d+u} = \frac{r}{100}$. Bei einer bestimmten Temperatur ist $d + u$ konstant gleich der absoluten Feuchtigkeit der Luft bei voller Sättigung. Jede der die Achsen unter 45° schneidenden Linien entspricht daher einer bestimmten Temperatur, die in Abb. 9 ebenfalls angegeben ist. Man kann daher für jeden in der Abbildung eingetragenen Punkt Temperatur, relative Feuchtigkeit, Dampfdruck und Sättigungsfehlbetrag ablesen. Die durch die Abbildung dargestellten Beziehungen sind aber, genau genommen, nur bei Einzelwerten richtig; bei Mittelbildungen aus mehreren Beobachtungen ergeben sich dabei Ungenauigkeiten, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll.

Um den Einfluß der einzelnen Witterungserscheinungen auf die Einsickerung festzustellen, war nun, wie gesagt, der Grunewald zunächst nicht besonders geeignet. Lehrreich hierfür ist ein flachliegender Grundwasserspiegel, bei dem die Wirkung der Einsickerung und Verdunstung viel unmittelbarer sichtbar wird.

Allerdings kommt dabei wieder ein erschwerender Umstand hinzu, nämlich, daß der flachliegende Grundwasserspiegel in kultivierten Gegenden dem Einfluß der benachbarten Vorfluter besonders unterliegt; diesen Einfluß muß man also dabei auch fortlaufend im Auge behalten.

Eine willkommene Gelegenheit zur Ergänzung der Beobachtungen im Grunewald bot sich mir im Dezember 1921 in Berlin-Zehlendorf. Ich konnte hier in einem Niederungsmoor in der einfachsten Weise durch Ausschachten eines Loches von ½ mal 1 m Größe eine Meßstelle einrichten, die auf jede Aenderung der Witterung sofort anschlug und so ein Gesamtbild des Witterungsverlaufs in seiner gewässerkundlichen Bedeutung lieferte. Im Dezember 1921 hatte ich die Beobachtungen in Abständen von mehreren Tagen ausgeführt, später habe ich in der Regel zweitätig, zuweilen auch mehrere Male am Tage gemessen, um so ein vollständiges Bild vom Verlauf der Schwankungen zu erhalten. In rund 50 m Abstand von der Meßstelle führt der „Wiesengraben“ vorbei, der die vom Straßenkörper und den Hausdächern in der Königstraße und benachbarten Straßenzügen abfließenden Wassermengen aufnimmt und kaum Sohlengefälle besitzt. In geringer Entfernung von der Meßstelle, etwas weiter unterhalb, liegt in diesem Graben ein Rohr, das im Frühjahr 1922 um 20 cm tiefer gelegt worden ist. Der Graben verhält sich ganz ähnlich, wie ein südafrikanischer Fluß, der nach heftigen Regengüssen „abkommt“. Nach solchem ist er nämlich stundenlang von schnellströmendem Wasser erfüllt. Gleichzeitig schwillt häufig das benachbarte Grundwasser stark an. Haben die Grundwasserstände eine besonders große Höhe erreicht, so kommt es auch vor, daß durch den erwähnten Durchlaß anhaltend etwas Wasser fließt, das aus dem Grundwasser an den Graben wieder abgegeben wird. Fällt das Wasser an der Meßstelle bis 45 cm unter den Meßpunkt (Geländeoberfläche) oder noch tiefer ab, so hört das ständige Fließen im Graben auf; er enthält dann nur noch stehendes Wasser, und wenn der Grundwasserspiegel um weitere 25 cm gefallen ist, so wird die Grabensohle trocken. Zwischen der Meßstelle und dem Graben war das Gelände bei hohen Winterwasserständen stellenweise der Ueberschwemmung durch von unten aufsteigendes Grundwasser ausgesetzt. Inzwischen ist das Gelände durch künstliche Aufhöhung im allgemeinen hochwasserfrei gemacht worden. Die Kenntnis solcher Einzelumstände ist zur richtigen Auswertung des Verlaufs von Grundwasserschwankungen bei flachliegendem Grundwasserspiegel unentbehrlich (Abb. 10).

Da an der Beobachtungsstelle selbst keine meteorologischen Beobachtungen ausgeführt werden konnten, seien diejenigen der Lehr- und Forschungsanstalt für Gartenbau in Dahlem, die rund 4 km entfernt ist, zum Vergleich herangezogen. Zu beachten ist dabei, daß die Niederschläge, die im Laufe eines Tages nach 8 Uhr morgens fallen und einen Grundwasseranstieg hervorrufen, erst am nächsten Morgen aufgezeichnet werden, so daß ein Vorauseilen des Grundwasseranstiegs vorgetäuscht werden kann, wenn man die Tageszeiten der Messungen nicht beachtet.

Im Dezember 1921 erfolgten die Beobachtungen noch nicht regelmäßig genug, um den Verlauf des Grundwassers genau verfolgen zu können. Nachdem der Wasserstand im trockenen Sommer 1921 sehr tief gewesen war, brachte der Dezember einen erheblichen Anstieg. Durch die Niederschläge von 14 und 8 mm am 2. und 3. Januar 1922 wurde der benachbarte Graben mit strömendem Wasser gefüllt und auch das Grundwasser stieg stark an, bis Frost einsetzte, der sofort ein Fallen des Wasserspiegels veranlaßte, aber nach wenigen Tagen durch Tau- und Regenwetter abgelöst wurde. Hierdurch wurde das in den obersten Bodenschichten festgefrorene Wasser wieder beweglich und es trat ein schneller Grundwasseranstieg von 18 cm ein; hierbei wirkten die Niederschläge mit, die in Dahlem am 9. und 10. Januar mit zusammen 12 mm gemessen worden sind. Mit dem Wiedereinsetzen des Frostes folgte ein ganz regelmäßiges, anfangs schnelleres, dann allmählich langsameres Fallen des Wasserspiegels. Da eine Verminderung des Grundwassers

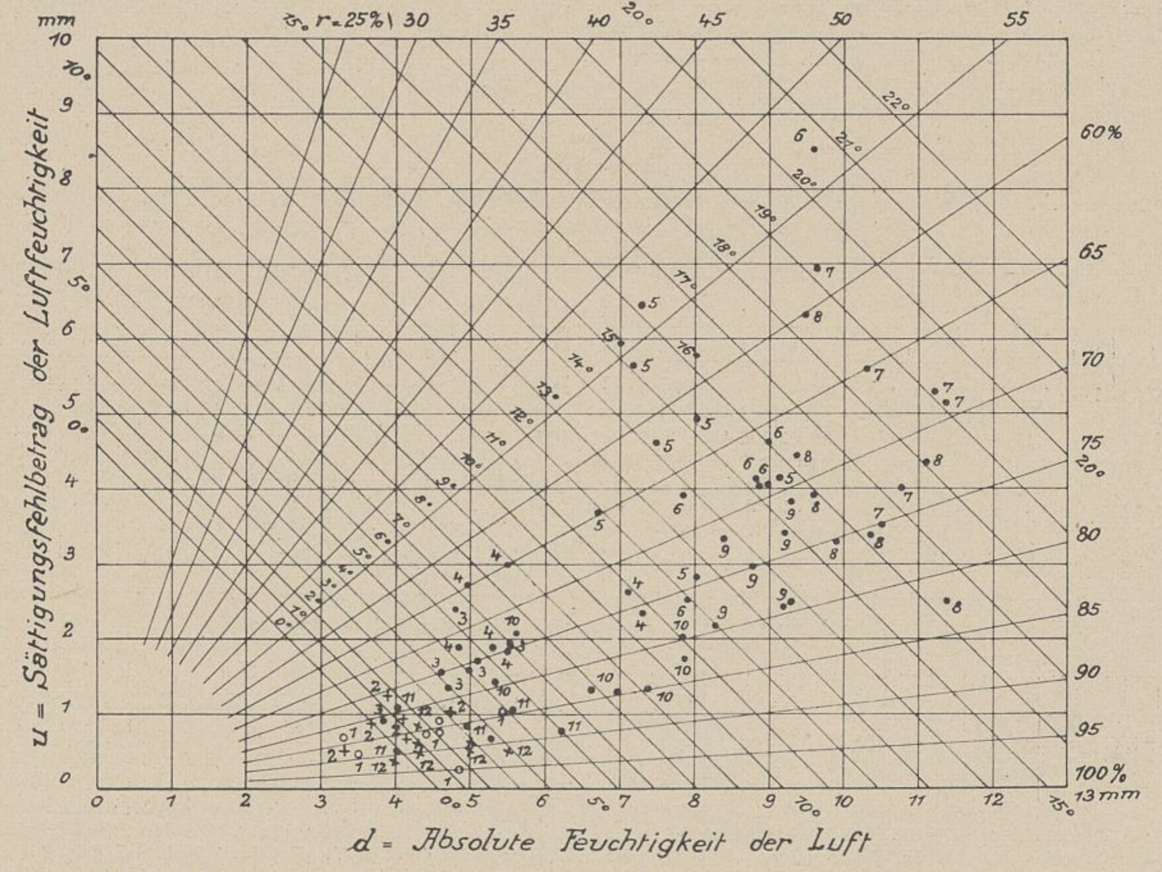
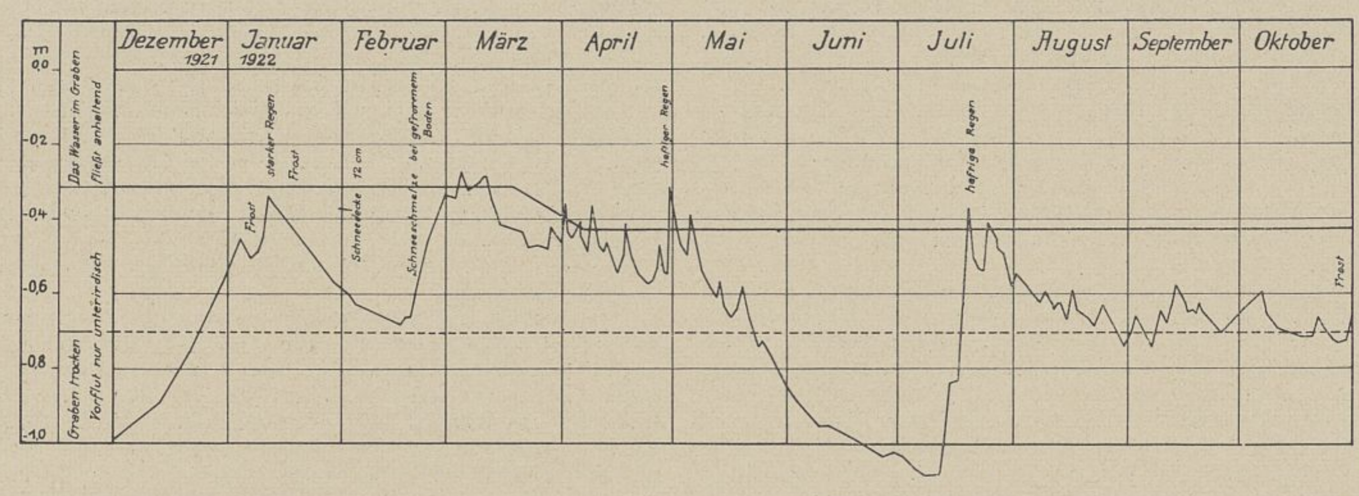


Abb. 9. Absolute und relative Feuchtigkeit der Luft, Sättigungsfehlbetrag und Temperatur in Dahlem. Monatsmittel 1917 bis 1923. Die Zahlen bedeuten die Monate z B. 11 = November.



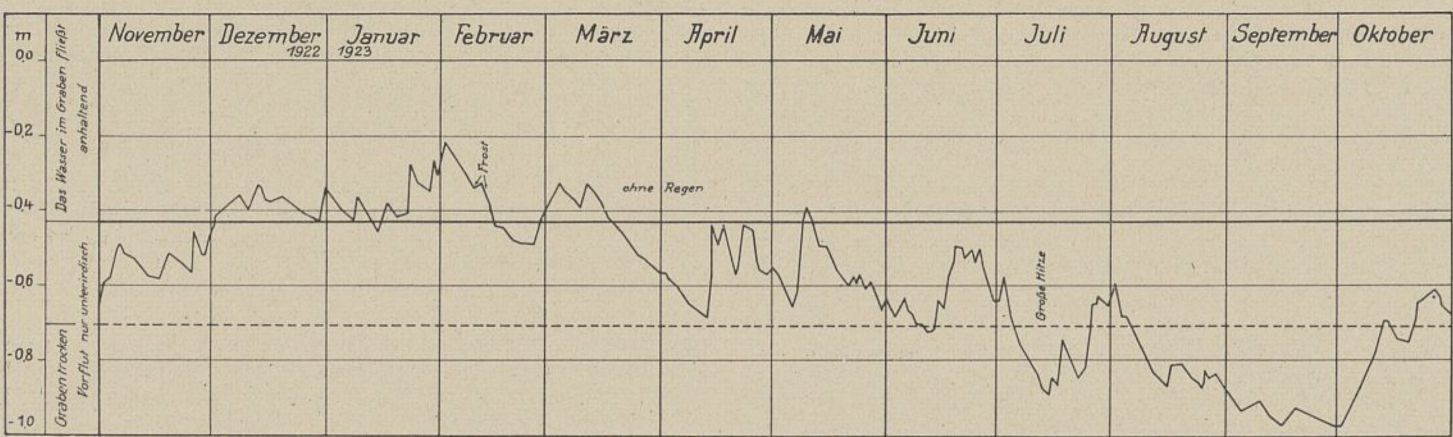


Abb. 10 Grundwasserspiegel in einem Niederungsmoor an der Grundwasserscheide in Berlin Zehlendorf. Anstieg des Grundwassers alsbald nach Regen oder Tauwetter, Abfall bei Frost im Januar und Februar 1922 und im Februar 1923, Abfall von Mitte März bis Mitte April 1923 in niederschlagsloser Zeit, stärkerer Abfall im Juni 1923 bei großer Hitze. Abfall trotz Niederschlägen im Mai und Juni 1922, starker Anstieg auch durch Sommerregen, z. B im Juli 1922.

durch kapillaren Aufstieg, der im Sommer das aus dem Boden verdunstete Wasser ersetzt und somit am Grundwasser zehrt, während des Frostes wohl nicht in Betracht kam, ist anzunehmen, daß das Fallen des Grundwasserspiegels auf unterirdischen Abfluß zurückzuführen ist. Der benachbarte Vorfluter spielte dabei gar keine Rolle, da das Wasser darin stillstand und alsbald bis auf den Grund zufror. Das Sinken betrug zuerst je Tag 2 cm und in 20 Tagen 28 cm, also je Tag 1,4 cm; in den letzten zehn Tagen, als das Druckgefälle schon wesentlich geringer geworden war, nur noch 4 cm, also je Tag nur noch 0,4 cm (Abb. 10).

In der Zeit vom 25. Dezember bis 12. Januar waren 60 mm Niederschläge gefallen. Nimmt man an, daß davon 7 mm verdunstet, 7 mm bei Eintritt des Frostes im Boden festgefroren sind, so bleiben rund 46 mm zur Hebung des Grundwasserspiegels von 70 auf 33, d. i. um 37 cm. Nun ist aber während dieser Zeit der Grundwasserspiegel durch unterirdischen Abfluß gesenkt worden, und zwar wird der Abfluß je Tag mindestens ebenso groß, wahrscheinlich aber noch größer gewesen sein, als zu Beginn der Frostperiode. Diese Senkung in 18 Tagen wird also mit rd. 32 cm anzusetzen sein. Rechnet man diesen Betrag zu der sichtbaren Hebung von 37 cm zu, so zeigt sich, daß 46 mm Wasser eine Hebung um rd. 690 mm, also um den 15fachen Betrag, bewirken. Mithin beträgt der für die Aufnahme von Grundwasser freie Raum, der sich natürlich durch Bodenuntersuchungen noch sicherer und genauer ermitteln ließe, etwa $\frac{1}{15}$ = rd. 7%.

Demnach erreichte der unterirdische Abfluß etwa 1 mm Wasserhöhe am Tage bei höheren Wasserständen.

Während der Frostperiode hatte sich eine Schneedecke von etwa 12 cm angefunden. Sobald Tauwetter eintrat, fing das Grundwasser sofort an zu steigen. Der Schnee schmolz und das Schmelzwasser versickerte, ehe der Boden auftaute. Mit der Zeit kam dann auch das vorher in den oberen Bodenschichten festgefrorene Wasser und etwas Regenwasser hinzu, so daß das schnelle Ansteigen bis Ende Februar anhielt.

In der Zeit vom 12. Januar bis 5. März waren rd. 50 mm Niederschlag gefallen, die anfangs durch den Frost zurückgehalten wurden. Da in der Niederung der Schnee reichlicher angeweht wurde, seien noch 5 mm dazu gerechnet. Die Verdunstung sei mit 13 mm angesetzt. Dann verbleiben vom Niederschlag 55—13=42 mm Wasser, die vom Beginn der Schneeschmelze bis zum 5. März den Grundwasserspiegel um 40 cm gehoben haben. Der unterirdische Abfluß mag in diesen 15 Tagen 15 mm betragen haben. Somit kann die Wassermenge, die den Grundwasserspiegel um rd. 40 cm gehoben hat, auf 42—15=27 mm geschätzt werden. Demnach nimmt das Grundwasser rd. $\frac{27}{400} = \frac{1}{15}$ = rd. 7% des Bodenraums ein. Diese bereits vorhin berechnete Zahl erscheint also auch nach dieser Betrachtung als annähernd zutreffend.

Irgendwelche Anzeichen dafür, daß im Januar oder Februar eine Kondensation von Wasser im Boden stattgefunden oder überhaupt die Luftfeuchtigkeit einen merkbaren Einfluß ausgeübt hätte, ließen sich nicht erkennen. Die Schwankungen der relativen Feuchtigkeit waren groß; es handelte sich aber stets um so geringen Dampfdruck, daß der Sättigungsfehlbetrag gering blieb.

Sehr deutlich zeigen sich die Launen des Aprilwetters im Grundwasserspiegel. Schon Regengüsse von etwa 10 mm genügen, um einen scharfen Anstieg hervorzurufen, dem aber nach Aufhören des Regens schnell ein Sinken folgt. Offenbar entsteht nach einem Regenguß an der Meßstelle ein Grundwasserberg, ein Ueberdruck, der sich sehr schnell durch Abwanderung in den Untergrund oder nach der Seite ausgleicht.

Es ergeben sich daher hohe Zahlen für den unterirdischen Abfluß, die aber nur für die allernächste Umgebung der Meßstelle gelten und keine allgemeine Bedeutung haben. Der Sättigungsfehlbetrag mit rd. 2 mm war im Durchschnitt im April noch klein, erreichte aber an einigen Tagen höhere Beträge, denen ein schnelles Sinken des Wasserspiegels entsprach.

Lehrreiche Beobachtungen konnte ich am Sonntag, den 30. April vornehmen, als ein heftiger, kalter Regen niederging, der in den Dahlemer Messungen mit 13,5 mm in Erscheinung trat, nach meiner Schätzung aber größer war und einen von Stunde zu Stunde sichtbaren Anstieg von 24 cm bewirkte. Es entspricht also wiederum etwa 1 mm Wasser rd. 15 mm Grundwasserhöhe.

Wärmere Witterung mit hohem Sättigungsfehlbetrag trat mit ziemlicher Verspätung erst Mitte Mai ein; der Boden erwärmte sich und das Pflanzenleben erwachte. Daher vermochten die Niederschläge, die in der Zeit vom 7. bis 31. Mai 25 mm betrugen und bei geringfügiger Verdunstung den unterirdischen Abfluß hätten ersetzen können, das Fallen des Wasserspiegels nur vorübergehend aufzuhalten. Jedenfalls hat die Verdunstung in der zweiten Hälfte des Mai den Niederschlag weit übertroffen. Das Sinken des Grundwassers ist nicht nur durch unterirdischen Abfluß erfolgt, sondern zum Teil auch, besonders in den letzten Tagen des Monats, durch

kapillaren Aufstieg, der das von den Pflanzen verbrauchte und sonst verdunstete Wasser ersetzte und so am Grundwasser zehrte. Ende Mai litten Sandböden in einigen Hundert Meter Entfernung von der Meßstelle schon unter einer ausgesprochenen Dürre.

Im Juni fielen 35 mm Niederschläge, also fast so viel wie im März, trozdem ein so viel tieferer Wasserstand infolge stärkerer Verdunstung. Diese war allerdings wohl nicht mehr so stark wie im Mai, da den Pflanzen das Wasser nicht mehr so unmittelbar reichlich zur Verfügung stand. Lehrreich ist auch ein Vergleich der Wirkung der Niederschläge im April und im Juni (einschließlich Anfang Juli).

Während im April jeder Regen einen Anstieg brachte, wurde ein Niederschlag von 2,7 mm am 4. bis 5. Juni von den oberen Bodenschichten als Haftwasser festgehalten. Spätere Regengüsse bis rd. 10 mm am Tag vermochten das weitere Sinken des Wasserspiegels wohl vorübergehend aufzuhalten, aber keinen Anstieg mehr hervorzurufen. Im April hatten die Sickerwasser den rd. ½ m weiten Weg durch durchnäßten Boden in wenigen Stunden zurückgelegt. Im Juni wurden sie dagegen auf dem rd. 1 m weiten Wege durch einen zum Teil ausgetrockneten Boden aufgehalten (Abb. 9).

Nach Ototzky sollen die Niederschläge nicht unmittelbar zum Grundwasser hinabdringen, sondern einen Druck auf die Bodenluft ausüben, der sich auf den Grundwasserspiegel überträgt. An den Stellen, wo der Grundwasserspiegel zum Zwecke der Beobachtung oder Wassergewinnung freigelegt worden ist, soll dann das Grundwasser herausgedrückt werden und so einen Anstieg des freigelegten Wasserspiegels bewirken. Meine vorstehenden Beobachtungen beweisen mit zwingender Deutlichkeit, daß diese Anschauungsweise falsch ist. Eine solche Druckübertragung hätte im Juni annähernd in derselben Weise erfolgen müssen wie im April.

Am 13. Juli morgens setzte ein heftiger andauernder Regen ein, der bis zum 14. anhielt und 44 mm Wasser brachte. Der Wiesengraben, der in den vorhergehenden Wochen trocken gewesen war, füllte sich mit fließendem Wasser, konnte also aus der Niederung kein Wasser aufnehmen, sondern eher solches abgeben. Der Sättigungsfehlbetrag der Luft sank dabei auf 0,4 mm am 13. und 1,5 mm am 14. herab. Das Grundwasser stieg ruckweise um 25 cm, hatte also von den 44 mm Wasser etwa 17 mm erhalten, während der weitaus größere Teil, nämlich 27 mm, größtenteils von den ausgetrockneten oberen Bodenschichten festgehalten wurde, zu einem kleinen Teile auch verdunstete.

Der Grundwasserspiegel wurde dann durch weitere heftige Niederschläge nochmals um 45 cm in die Höhe getrieben, so daß sich der ungewöhnliche Anstieg von 70 cm durch 125 mm Niederschlag in einer Woche ergab. Man könnte meinen, daß bei einem für Grundwasserbewegung freien Hohlraum im Boden von $\frac{1}{15}$ bereits 72 mm Wasser genügen würden, um den Grundwasserspiegel von 1,08 m unter Gelände bis zur Oberfläche zu heben, also die heftigen Regengüsse eine Ueberschwemmung hätten hervorrufen müssen, die nicht eingetreten ist. Es mögen etwa in der Woche an der Meßstelle 15 mm unterirdisch abgeflossen, 10 mm verdunstet sein, 47 mm den Grundwasserspiegel gehoben, 53 mm zum Ersatz des vorher verdunsteten Haftwassers gedient haben. Nehmen wir an, daß die Verdunstung bis 53 cm Tiefe gewirkt hat, so muß der Boden 10 v H Haftwasser durch Verdunstung verloren gehabt haben, was bei Moorboden an sich verständlich erscheint. Aufallelnd ist nur, daß dann nicht der erste Regenguß vom 13.—14. Juli fast restlos als Haftwasser aufgenommen worden ist. Vielleicht waren auch die Niederschläge in Zehlendorf auf die einzelnen Tage anders verteilt wie in Dahlem, da gerade die sehr heftigen Regen örtlich begrenzte Gebiete zu betreffen pflegen. Jedenfalls kann man den Anstieg von 70 cm vollständig durch die Niederschläge erklären und braucht keineswegs die Kondensation zu Hilfe zu nehmen. Wir müssen hierin von den Anschauungen Keilhacks (12, S. 103) abweichen, der glaubte, Anstiege von 30 bis 80 cm, die er in der ersten Februardekade in der Niederlausitz beobachtet hatte, nur unter Zuhilfenahme der Kondensation erklären zu können.*)

Bei dem höchsten Stand im Juli war wohl an der Meßstelle ein erheblicher Ueberdruck gegenüber dem Wasser der Nachbarschaft vorhanden, daher folgte ein schroffes Fallen, bis abermals ergiebige Niederschläge den Grundwasserspiegel hochtrieben.

Der milde und schneearme Winter 1923 brachte hohe Grundwasserstände.

Bemerkenswert ist, daß starker Frost im Februar 1923 ein schroffes Sinken des Grundwassers zur Folge hatte, dem bei nachfolgendem Tauwetter ein schneller Anstieg folgte. Bei dem Frost wurde in den benachbarten Niederungen das oberste Grundwasser selbst infolge seiner Lage an der Geländeoberfläche zum Gefrieren gebracht und erst bei Eintritt des Tauwetters wieder beweglich.

Hingewiesen sei noch auf das gleichmäßige Fallen des Grundwasserspiegels in der regenlosen Zeit von Mitte März bis Mitte April. Viel schroffer war der Abfall im Juli 1923 infolge der großen Hitze und Trockenheit der Luft. Der Sättigungsfehlbetrag der Luft erreichte in diesem Monat den hohen Durchschnittswert von über 5 mm und überstieg zeitweise 10 bis 12 mm.

Aus den vorstehenden Beobachtungen lassen sich also folgende Gesetze ableiten:

Ein Steigen des Grundwassers wird nicht durch hohe Luftfeuchtigkeit allein, sondern durch ergiebige Niederschläge sowie durch Tauwetter bewirkt. Ein Sinken des Grundwasserspiegels erfolgt teils durch unterirdisches Abfließen, teils durch kapillares Aufsteigen von Wasser; dies wird ermöglicht durch die Verdunstung, die besonders das von den Pflanzen erfaßte Wasser betrifft und auf diese Weise am Grundwasser zehrt. Durch geringe Luftfeuchtigkeit und andere meteorologische Einflüsse wird diese Verdunstung befördert. Die Luftfeuchtigkeit wird zweckmäßig durch den Sättigungsfehlbetrag gekennzeichnet; die relative Feuchtigkeit führt weniger gut zum Ziele. Geringe Luftfeuchtigkeit trägt zuzeiten auch dazu bei, die oberen Bodenschichten so auszutrocknen, daß sie später auftreffende Niederschläge als Haftwasser aufsaugen und nicht als Sickerwasser zum Grundwasserspiegel hinabdringen lassen. Die Grundwasserstände werden also durch ein mannigfaches Wechselspiel von Niederschlag, Luftfeuchtigkeit, Pflanzenwuchs und Bodenfrost bedingt, während Windstärke, Bewölkung und dergleichen wohl auch wirksam sind, sich aber nur sehr schwierig zahlenmäßig einigermaßen erfassen lassen.

Von wesentlichem Einfluß ist dabei auch die Durchlässigkeit des Bodens. Der Niederungsmoorboden weist hier eine erhebliche Durchlässigkeit auf, und zwar sind es einzelne Röhrchen im Untergrund, in denen sich das Wasser schneller bewegen kann. Es ist das insofern bemerkenswert, als in den Lehrbüchern die geringe Durchlässigkeit des Torfes hervorgehoben wird, ohne daß das Vorkommen auch durchlässigerer Torfe erwähnt wird.

Eine solche einfache Beobachtungsstelle des obersten Grundwasserspiegels gibt die Gesamtwirkung einer ganzen Reihe meteorologischer Erscheinungen wieder, die im einzelnen nur durch sehr umständliche und kostspielige Verfahren festgestellt werden können. Solange uns nicht die Mittel zur Verfügung stehen, um Lysimeteranlagen und sonstige geeignete Vorrichtungen in größerem Umfange aufzustellen, bilden solche einfachen Beobachtungsstellen einen nicht zu verachtenden Behelf.

Nebenbei sei bemerkt, daß der Grundwasserspiegel im Meßloch zuweilen um 1 bis 2 cm von dem Stande abwich, den ich nach den sonstigen meteorologischen Einwirkungen und den bis dahin gesammelten Erfahrungen erwarten durfte. Solche Abweichungen fielen mit Schwankungen des Luftdruckes zusammen in der Weise, daß bei steigendem Barometerstand der gemessene Wasserstand etwas zu tief, vor allem aber bei sinkendem Barometerstand um etwa 1 cm zu hoch wurde. Anscheinend wirkte die Druckentlastung durch das Sinken des Luftdruckes schneller auf den freigelegten Wasserspiegel im Meßloch als auf den im Boden steckenden Grundwasserspiegel. Diese durch den Luftdruck bewirkten Abweichungen des freigelegten Wasserspiegels vom wirklichen Grundwasserspiegel sind also so gering, daß sie unbedenklich vernachlässigt werden können.

Im Grunewald ist nun die Einwirkung der Witterung auf die Versickerung grundsätzlich eine ähnliche wie an der geschilderten Beobachtungsstelle in Zehlendorf. Daß diese Versickerung im Grunewald aber nicht so unmittelbar auf den Grundwasserspiegel einwirken kann, ist bereits in dem Abschnitt über das Eindringen des Wassers in den Boden dargelegt worden.

Zur bildlichen Darstellung des Witterungsverlaufs bei Grundwasserbeobachtungsstellen im Flachlande, die nicht zu dicht an offenen Gewässern liegen, bei denen ein nennenswerter oberirdischer Wasserabfluß nicht stattfindet und der unterirdische annähernd gleichmäßig erfolgt, eignen sich folgende Verfahren, von denen die beiden ersten bereits in meinem Aufsatz „Die Ursachen der Grundwasserstandsschwankungen" (37) eingehender erwähnt worden sind.

Bei der Ableitung dieser Verfahren müssen mehrere zunächst ziemlich willkürlich erscheinende Annahmen gemacht werden. Trotz der theoretischen Bedenken, die gegen sie erhoben werden können, haben sie sich aber als praktisch brauchbar erwiesen (Abb. 11). Ist im Verlaufe einer Zeitspanne eine Hebung (+ H) oder Senkung (— H) des Grundwasserspiegels eingetreten, so läßt sich daraus die Vermehrung (+ h) oder Verminderung (— h) des Grundwasservorrats in Milimeter reiner Wasserhöhe ausgedrückt berechnen. Das Verhältnis H : h wechselt je nach den Bodenverhältnissen und ist in Sandgebieten häufig etwa 5 : 1. Die Verzögerungen bei der Versickerung machen es unmöglich, h aus den Witterungsverhältnissen

*) Keilhack gibt bei seinen Beobachtungen nicht das Jahr an, in welchem diese Erscheinungen aufgetreten sind, so daß ich nicht feststellen kann, ob sie auf eine starke Schneeschmelze zurückzuführen sind. Dem Anstieg von 300 mm dürfte eine Wasserhöhe von rd. 300 : 5 = 60 mm entsprechen (nicht, wie Keilhack angibt, von 120 mm). Der Anstieg von 80 cm ist vielleicht an einer tiefer liegenden Stelle vorgekommen, wo das Wasser zusammenfloß.

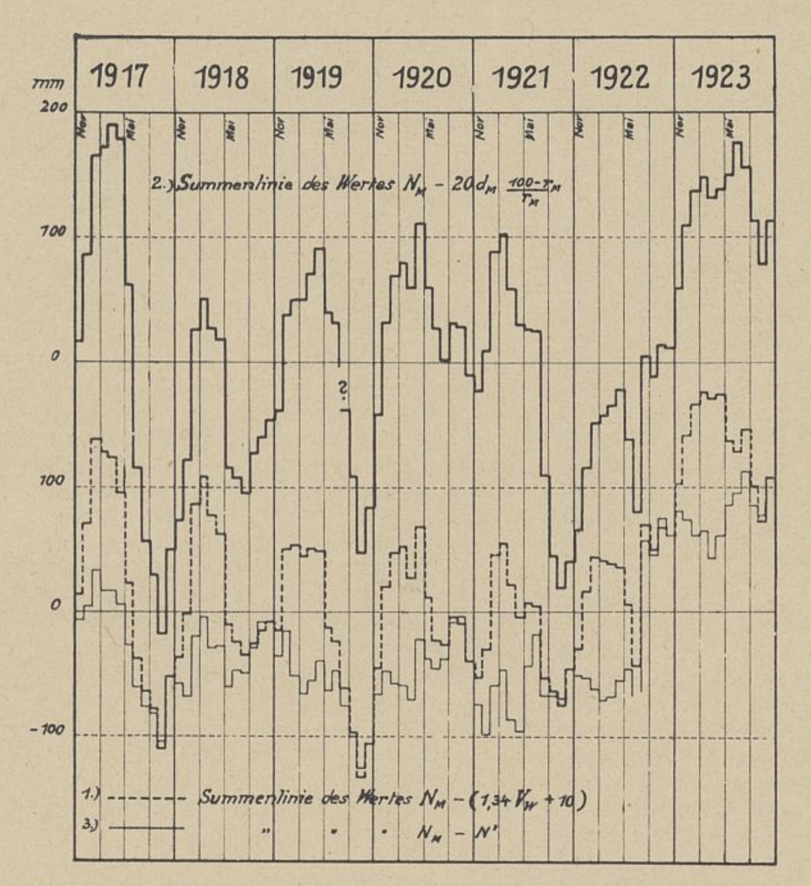


Abb. 11. Bedeutung der Witterung für den Grundwasserstand.

Summenlinie 1 (gestrichelt) zeigt den Gang des Grundwassers spiegels, wie er auf Grund der jeweiligen Monatsniederschläge N_M und der Durchschnittswoche der Verdunstung und des Abflusses zu erwarten wäre, wenn keine Verzögerungen beim Hinabsickern usw. einträten.

Summenlinie 2 (stark ausgezogen) zeigt, welcher Gang des Grundwasserspiegels zu erwarten wäre, wenn ihn nur die jeweiligen Beträge des Niederschlags und des Sättigungsfehlbetrages der Luftfeuchtigkeit beeinflußten.

Summenlinie 3 zeigt, welcher Gang des Grundwasserspiegel- zu erwarten wäre, wenn ihn nur die Abweichungen der jeweiligen Monatsniederschläge von den Durchschnittsniederschlägen der 12 Monate bestimmen würden.

genau zu berechnen. Es sei daher die Verzögerung zunächst vernachlässigt und der so aus den Witterungsverhältnissen berechnete Wert als h_1 bezeichnet. Aus dem Vergleich von h und h_1 lassen sich dann Schlüsse auf die Dauer der Verzögerungen ziehen. Die Werte von h_1 hängen ab vom Niederschlag, von der Verdunstung und von dem unterirdischen Abfluß, der ständig Wasser von der Beobachtungsstelle fortführt. Es sei in Millimeter Wasserhöhe:

N_M der jeweilige Monatsniederschlag;

V_M die jeweilige Monatsverdunstung;

A_M der jeweilige Monatsabfluß, der an der Beobachtungsstelle entsteht unter Vernachlässigung des an dieser lediglich durchfließenden Wassers. Es ist dann

$$h_1 = \Sigma N_M - \Sigma V_M - \Sigma A$$

Während N_M durch Messungen bekannt ist, können V_M und A_M nur roh geschätzt werden. Zur Vereinfachung der Rechnung ist dabei die ja annähernd zutreffende Annahme gemacht worden, daß nach einer längeren Reihe von Jahren der Grundwasserspiegel wieder auf die Ausgangslage zurückkehrt, also $h_1 = O$ wird. Zur Berechnung von h_1 werden also von den jeweiligen Monatsniederschlägen Abzüge gemacht, die so gewählt sind, daß bei langjährigen Reihen die Summe der Abzüge gleich der Summe der Niederschläge ist. Trägt man die Werte für h_1 von Monat zu Monat auf, so erhält man eine Linie, die um eine wagerechte Gleichgewichtslage pendelt.

Im Durchschnittsjahr ist $h_1 = N - V - A = O$, $V = N - A$.

Es sei zunächst angenommen, daß der Monatsabfluß konstant gleich $\frac{A}{12}$ ist und daß die monatlichen Landesverdunstungssummen konstant sind und sich zueinander verhalten wie die entsprechenden in der Wildschen Schale in Potsdam ermittelten Verdunstungszahlen V_w deren Jahressumme beträgt 351 mm. Es sei also gesetzt: $\frac{V_M}{V_w} = \frac{V}{351} = \frac{N-A}{351}$, woraus folgt $V_M = V_w \cdot \frac{N-A}{351}$. Es wird also

$$1)\quad h_1 = \Sigma N_M - \Sigma\left(V_w \cdot \frac{N-A}{351} + \frac{A}{12}\right)$$

V_w beträgt in mm für

Nov.	Dez.	Jan.	Febr.	März	Apr.	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.
9,5	8,2	9	11,1	22,2	36,1	53,9	55,3	51.75	45,75	30,6	17,2

Winter	Sommer	Jahr
96	255	351

Die Berechnung von $\frac{N-A}{351} \cdot V_w + \frac{A}{12}$ ergibt für Dahlem folgende Werte in Millimetern:

Nov.	Dez.	Jan.	Febr.	März	Apr.	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept.	Okt.
23	21	22	25	40	58	83	84	80	72	51	33

Winter	Sommer	Jahr
189	403	592

Diese Beträge sind also von den jeweiligen Dahlemer Monatsniederschlägen abgezogen worden; die so berechneten positiven oder negativen Werte sind fortlaufend addiert und die einzelnen Summen aufgetragen worden. So ist die untere gestrichelte Linie in Abb. 11 entstanden.

2. Will man unter Außerachtlassung des Abflusses lediglich Niederschlag und Verdunstung mit den Grundwasserständen vergleichen, so verwendet man die Formel

$$h_2 = \Sigma N_M - a \Sigma V_M.$$

Als Ersatz für die nicht näher bekannte Landesverdunstung kann man dabei den Sättigungsfehlbetrag u, der an zahlreichen meteorologischen Stationen gemessen wird, einführen. Setzt man dabei, damit die Summenlinie um eine wagerechte Gleichgewichtslage pendelt, für die langjährige Reihe, $h_2 = O$, so muß man den Faktor a so wählen, daß

$\Sigma N_M - a \Sigma V_M = 0$ wird. Ist $\frac{N}{12}$ der langjährige Durchschnitt des Niederschlags für einen Monat und u der langjährige Durchschnitt des Sättigungsfehlbetrages für einen Monat, so wird diese Bedingung durch die Summenlinie

$$2)\quad h_2 = \Sigma N_M - \Sigma \frac{N}{12u} \cdot u_M$$

erfüllt, (denn im Durchschnittsjahre ist $\Sigma N_M = N$, $\Sigma u_M = 12u$). In vorstehender Formel bedeutet:

N_M = die jeweilige Monatssumme der Niederschläge,

N = Jahresniederschlag im langjährigen Mittel (für Dahlem 592 mm),

u = Sättigungsfehlbetrag im langjährigen Durchschnitt (für Dahlem rd. 2,5 mm),

$\frac{N}{12u}$ ist für Dahlem rd. 20,

u_M = jeweiliges Monatsmittel des Sättigungsfehlbetrages, zeichnerisch (Abb. 12) ermittelt aus der Formel

$$u_M = d_M \frac{100 - r_M}{r_M},$$

in dieser bedeutet:

d_M = jeweiliges Monatsmittel der absoluten Luftfeuchtigkeit,

r_M = jeweiliges Monatsmittel der relativen Luftfeuchtigkeit (%).

Es ist also für jeden Monat der Wert

$$N_M - 20 d_M \frac{100 - r_M}{r_M}$$

von Dahlem ermittelt worden; die sich so ergebenden positiven oder negativen Zahlen sind fortlaufend addiert und die einzelnen Summen aufgetragen worden. So ist die obere stark ausgezogene Linie in Abb. 11 entstanden, die man ihrem Aussehen nach ohne weiteres für eine Grundwasserstandslinie halten könnte.

3. Will man lediglich die Niederschläge mit den Grundwasserständen vergleichen, um zu erkennen, welche Abweichungen zwischen dem Gang der Niederschläge und demjenigen des Grundwasserspiegels eintreten, so zeichnet man die Summenlinie für die Abweichungen der Niederschläge gegen die Mittelwerte $N_M - N'$. Hier sind vom jeweiligen Monatsniederschlag N_M die langjährigen Mittel der Niederschläge der einzelnen Monate N', wie sie die letzte Zeile der Zahlentafel von Dahlem (S. 11) angibt, abgezogen worden. Die so berechneten positiven oder negativen Werte sind fortlaufend addiert und die einzelnen Summen nacheinander aufgetragen worden. So ist die untere schwächer ausgezogene Linie in Abb. 11 entstanden, die steigt, wenn die Niederschläge eines Monats übernormal, und fällt, wenn sie unternormal waren. Die Summe der Abzüge in jedem einzelnen Jahr ist sowohl bei der zweiten Linie wie bei der dritten 592 mm. Beide Linien decken sich also im Oktober. In den dazwischenliegenden Monaten besteht aber der Unterschied, daß die schwach ausgezogene Linie lediglich vom Niederschlag abhängt, die gestrichelte Linie aber auch von Durchschnittswerten für Abfluß und Verdunstung. Es mag überraschen, daß hier Jahr für Jahr dieselben Beträge für Abfluß und Verdunstung abgezogen worden sind. Es hat das seinen Grund darin, daß die Abweichungen der tatsächlichen Werte in den einzelnen Jahren von den Durchschnittswerten nicht ermittelt werden können und auch für den Gang des Grundwasserspiegels in bestimm-

ten Fällen keine große Bedeutung besitzen, so wichtig sie auch für andere gewässerkundliche Fragen sind. Es hat sich bei der Untersuchung mehrerer Beispiele gezeigt (37), daß diese gestrichelte Linie weitgehende Uebereinstimmung mit dem Grundwassergang zeigt. Zur Vermeidung von Mißverständnissen sei betont, daß hier unter A nur der Abfluß an den Beobachtungsstellen[1]), nicht etwa der eines Flußgebietes zu verstehen ist. Bei der Summenlinie 2 ist der Abfluß ganz außer acht gelassen und der Sättigungsfehlbetrag als ein allerdings nicht ganz gleichwertiger Ersatz für die Verdunstung neben dem Niederschlag berücksichtigt; Vergleiche mit dem Gang des Grundwasserspiegels haben aber gezeigt, daß dieser vom Sättigungsfehlbetrag nicht so stark beeinflußt wird wie die Linie 2.

Praktisch brauchbar ist daher zurzeit Linie 3, da sie nicht auf geschätzten, sondern nur auf gemessenen Zahlen beruht, die von zahlreichen Punkten in Deutschland beschafft werden können. Sie gibt jedenfalls ein besseres Bild als eine einfache Auftragung der Monatsniederschläge, wie sie bisher meist üblich war, und wird daher zurzeit bei Untersuchungen über die Beziehungen zwischen den Grundwasserstandsschwankungen und den Niederschlägen in der Landesanstalt für Gewässerkunde in größerem Umfange verwendet. Sie weicht aber naturgemäß vom Gange der Versickerung und noch mehr des Grundwasserspiegels stark ab. Man tut daher gut, wenigstens in ausgewählten Fällen alle drei Linien nebeneinander unter wohlerwogener Berücksichtigung der jeder einzelnen anhaftenden Mängel zu benutzen, um einen bildlichen Vergleich zwischen dem Gange der Witterung und demjenigen des Grundwassers zu schaffen, wo die Aufstellung genauerer, mathematisch faßbarer Beziehungen nicht möglich ist.

Auf die Witterungsverhältnisse der Jahre, die der Einrichtung unseres Grundwasserbeobachtungsdienstes vorangingen, sei nur kurz hingewiesen. Die bekannte Trockenheit des Sommers 1911 fällt besonders in Dahlem mit nur 145 mm Niederschlag auf. Auch der folgende Winter 1912 lieferte nur geringe Niederschläge und konnte nur eine schwache Erholung der Wasserstände veranlassen. Auch der Sommer 1912 war ziemlich trocken. Im Winter 1913 waren die Niederschläge zwar etwas reichlicher als 1912, aber doch noch bescheiden. Eigenartig ist der Sommer 1913, der in Westend 305 mm Niederschlag, in Dahlem aber nur 217 mm brachte. Im Winter 1914 fielen im Dezember und März reichlichere Niederschläge bei mildem Wetter; sie führten einen erheblichen Anstieg des Wasserspiegels beim Hundekehlensee und Grunewaldsee herbei. Auch die Monate Mai bis Juli 1914 wiesen reichliche Niederschläge auf, so daß die Wasserklemme von 1911 bis 1913 nun im allgemeinen überwunden war. Der Winter 1915 brachte reiche Niederschläge, der Juni dieses Jahres eine Dürre.

In der ersten Hälfte des Winters 1916 fielen reiche Niederschläge, auch der Sommer dieses Jahres war naßkalt. Es war daher dem Beginn unserer Beobachtungen keine besonders trockene Zeit vorangegangen.

Für die Verfolgung der Abhängigkeit des Grundwasserstandes von der Witterung können natürlich nur diejenigen Rohre herangezogen werden, die von künstlichen Eingriffen möglichst unbeeinflußt sind. Sehr störend für diese Untersuchungen war die Verstärkung der Förderung des Wasserwerkes Teufelssee um etwa die Hälfte der früheren Wassermenge (Abb. 6). Sie bewirkte, daß die Grundwasserstände in ausgedehnten Teilen des Waldes einer stärkeren künstlichen Einwirkung ausgesetzt wurden.

W i n t e r 1917. Der Winter war gekennzeichnet durch langdauernden Frost, der eine Zurückhaltung des Sickerwassers bewirken mußte. Die Schneeschmelze begann im Februar und zog sich durch Rückfälle des Frostes lange hin. Erst Anfang April war der Boden ganz durchgetaut. Der Dezember und Januar ergaben recht reichliche, der Februar bescheidene Niederschläge. Bei der Havel zeigen sich infolge der Zurückhaltung des Wassers durch den Frost tiefere Wasserstände im Februar und März als im Januar und April. Die Havelwasserstände im April waren für diesen Monat ungewöhnlich hoch.

Die Wirkung dieser Witterungserscheinungen ist beim Grundwasser des Grunewaldes stark ausgeglichen. Es zeigt sich nur ein gleichmäßiger Anstieg um 10 bis 20 cm. Die Schneeschmelze fällt in den Wasserständen der Beobachtungsrohre nicht besonders auf. Einzelne Abweichungen vom gleichmäßigen Verlauf sind so geringfügig, daß sie wohl auf Messungsfehlern beruhen mögen. Der Höchststand stellte sich beim Hundekehlensee und dem unter Moorboden hinabreichenden Rohr 15 bereits um den 1. April ein. Sonst zeigt sich beim Grundwasser im allgemeinen eine Verzögerung von etwa einem Monat. Außerdem haben bei dem gesamten Grundwasseranstieg wahrscheinlich noch aus dem Abflußjahre 1916 stammende Sickerwässer ihren Einfluß geltend gemacht. Die Ursachen dieser Verzögerungen sind in den Abschnitten über das Eindringen des Wassers in den Boden und über die Fließbewegung des Grundwassers behandelt.

[1]) Die an der Beobachtungsstelle nur durchfließende Wassermenge ist in A nicht enthalten.

S o m m e r 1917. Der Mai und Juni zeichneten sich durch geringe Niederschläge und geringe Luftfeuchtigkeit aus (Abb. 11). Es konnte daher nicht nur kein Sickerwasser tiefer hinabdringen, sondern es mußte vielmehr der Wasservorrat des Bodens durch Verdunstung vermindert werden. Auch von den Juli- und Augustniederschlägen dürfte nicht viel bis zum Grundwasserspiegel hinabgedrungen sein; wohl aber haben sie den Haftwasservorrat des Bodens ergänzt. Im Oktober bewirkten reichlichere Niederschläge und geringe Verdunstung (Abb. 11) eine reichlichere Bildung von Sickerwasser, das den Grundwasserspiegel zum Teil an solchen Stellen erreichte, wo er nicht zu tief unter der Geländeoberfläche liegt (Abb. 3, 4, 5). Annähernd ist der Anstieg des Winters 1917 durch den Abfall im Sommer wieder ausgeglichen worden.

W i n t e r 1918. Die Niederschläge waren etwas größer als im Winter 1917; aber auch der Sättigungsfehlbetrag war in den Monaten März und April größer. Die Sickerwasserbildung wird daher annähernd denselben Betrag erreicht haben wie im Vorjahre. Da, wo der Grundwasserspiegel in geringer Tiefe unter der Geländeoberfläche liegt, zeigt er daher einen ähnlichen Winteranstieg wie im Vorjahre; an anderen Stellen, z. B. bei Rohr 29, 25 und 26 (Abb. 2), ist ein Teil des Sickerwassers im Boden zum Ausgleich der Dürre des Sommers 1917 festgehalten worden, so daß die Wirkung der Einsickerung auf den Grundwasserspiegel abgeschwächt worden ist. Der Höchststand ist bei Rohr 15 bereits im Februar aufgetreten und hat sich bei den tiefen Rohren, z. B. 29, bis Anfang April verzögert.

S o m m e r 1918. Dieser ist zwar an Niederschlägen wie an Luftfeuchtigkeit wesentlich reicher als der Sommer 1917 (Abb. 11); trotzdem zeigt sich ein ähnlicher Abfall des Wasserspiegels, und das Jahr 1918 bringt im ganzen Verluste des Grundwasservorrats. Der Grund hierfür ist wohl in einer l a n g e n a c h w i r k e n d e n F o l g e d e s t r o c k e n e n S o m m e r s 1917 zu suchen. (Vergl. Abschnitt 3.)

A b f l u ß j a h r 1919. Der milde Winter 1919 war niederschlagsarm; das zeigt sich auch in den niedrigen Wasserständen der Havel (Abb. 7a). Der Fehlbetrag beträgt etwa 40 mm, was einer Grundwasserhöhe von rd. 16 bis 20 cm entsprechen dürfte. Demgemäß zeigt sich nur bei flachliegendem Grundwasserspiegel ein ganz geringer Anstieg, bei tiefliegendem gar keiner. Der Sommer 1919 war niederschlagsärmer als der von 1917 und ergab einen beträchtlichen Grundwasserabfall. Auch in den Summenlinien der Abb. 11 erscheint 1919 als ein ausgesprochenes Verlustjahr.

A b f l u ß j a h r 1920. Der Winter 1920 war mild und niederschlagsreich und brachte einen reichlichen Zuwachs an Sickerwasser, nur der März war niederschlagsarm. Demgemäß zeigt sich ein deutlicher Grundwasseranstieg im Laufe des Winters von rd. 20 cm; bei flachliegendem Grundwasser ist im März ein ganz geringer Abfall zu bemerken.

Im Sommer 1920 erreichten die Niederschläge und die Luftfeuchtigkeit ähnliche Beträge wie 1918. Die Grundwasserstände verhielten sich aber günstiger. Bei flachem Grundwasserspiegel blieben sie annähernd gleichmäßig, bei tiefliegendem stiegen sie weiterhin an. Dies günstige Verhalten ist zum Teil auf eine Nachwirkung der reichlichen Sickerwasserbildung des Winters zurückzuführen.

A b f l u ß j a h r 1921. Die Witterungsverhältnisse wichen durchaus von den normalen ab (Abb. 11). Zunächst war der November ganz ungewöhnlich niederschlagsarm. Die in diesem Monat gewöhnliche Sickerwasserbildung blieb aus. Der Januar brachte bei mildem Wetter reiche Niederschläge, die bei flachliegendem Grundwasserspiegel einen Anstieg von etwa 10 cm hervorriefen. Der März war wieder ganz ungewöhnlich niederschlagsarm bei ungewöhnlich hohem Sättigungsfehlbetrag. Im ganzen konnte in diesem Winter die Sickerwasserbildung nur bescheidene Beträge erreichen.

Im Mai und Juni traten zwar reichliche Niederschläge ein; sie konnten aber im Monatsdurchschnitt bei hohem Sättigungsfehlbetrag nur bescheidene Ueberschüsse an Sickerwasser liefern.

Im Juli blieben die Niederschläge fast ganz aus, die Luftfeuchtigkeit sank auf einen sehr niedrigen Betrag ($r = 58\%$, $u =$ rd. 6,9 mm). Die oberen Bodenschichten trockneten aus und mußten daher die Sickerwassermengen der folgenden Monate als Haftwasser festhalten. Infolgedessen sank der Grundwasserspiegel in ähnlicher Weise wie im Sommer 1917.

Das abnorme Jahr 1921 war daher für das Grundwasser ein Verlustjahr. In Abbildung 11 tritt der Verlust bei der oberen Linie zu stark hervor, bei den unteren, die den Sättigungsfehlbetrag dieses Jahres nicht berücksichtigen, wohl zu wenig.

A b f l u ß j a h r 1922. Der Winter 1922 war für die Sickerwasserbildung nach Menge der Niederschläge bei mäßigem Sättigungsfehlbetrag einigermaßen günstig. Infolgedessen zeigte sich bei dem flacherliegnden Grundwasser im Zuge der Seenkette ein mäßiger Anstieg von 8 bis 18 cm, der fast ganz auf die Zeit vor der Frostperiode entfällt. Dieser entsprach hier nur ein Abfallen von wenigen Zentimetern, dann erreichte das Grundwasser zur Zeit

der Schneeschmelze und bis in den Mai hinein ungefähr wieder den alten Stand. Beim tiefliegenden Grundwasser blieb der Wasserstand infolge der Nachwirkung des trockenen Sommers 1921 im Winter 1922 nahezu unverändert (Abb. 2).

Im Sommer 1922 zeigte sich zunächst im Mai und Juni der gewöhnliche Abfall beim flacherliegenden Grundwasser. Dann aber drangen hier die reichlichen Juli-Niederschläge (Abb. 10 und 11) durch und erzeugten sogar vorübergehend einen leichten Anstieg (Abb. 3, 4 und 5).

Im ganzen gleichen sich bei dem flacheren Grundwasser im Grunewald im Jahre 1922 Gewinn und Verlust etwa aus; bei dem tiefliegenden Grundwasser bleibt sogar noch ein geringer Verlust. Bei der hohen Jahressumme der Niederschläge hätte man wohl ein günstigeres Ergebnis erwartet. Vermutlich wirkte aber die Trockenheit des Jahres 1921 noch nach.

Abflußjahr 1923. Der Winter 1923 wies um einen geringfügigen Betrag größere Niederschläge auf als der vorhergehende. Infolge der Nachwirkung des nassen Sommers 1922 war jedoch ein etwas stärkeres Ansteigen des Grundwassers zu erwarten, wie das auch z. B. Rohr 34 zeigt. Lehrreich ist auch die vereinigte Wirkung von hohem Niederschlag und geringem Sättigungsfehlbetrag im Mai und Juni — statt des gewöhnlichen Abfalls des Wasserspiegels ein weiterer Anstieg. Zugute kam dem Grundwasserstand bis zum Ende des Abflußjahres auch die Nachwirkung der ersten acht Monate. So hat das Jahr 1923 dem Grundwasser im Grunewald einen Gewinn von rd. 20 cm gebracht.

IX. Zusammenfassung.

a) Schlußfolgerungen über die Beziehungen des Grundwasserstandes zu den meteorologischen Einflüssen.

Die im Grunewalde und seiner Umgebung beobachteten Tatsachen lassen sich mit manchen Anschauungen von Soyka, Stiny, Ototzky u. a. nicht in Einklang bringen. Soyka (1a), dem wir eine gründliche und wohl durchdachte Arbeit über die Schwankungen des Grundwassers verdanken, dem aber in der damaligen Zeit (1888) erst bescheidene Hilfsmittel zu Gebote standen, hat bei seiner Besprechung der Berliner Gegend die Bedeutung der Verdunstung im Vergleich zum Niederschlag zu sehr in den Vordergrund treten lassen. Der von Stiny in seinem Lehrbuch der technischen Geologie gegebene Auszug aus Soykas Anschauungen kann leicht zu irrigen Vorstellungen führen. Keilhack (12) hat in manchen seiner Aeußerungen die Bedeutung der Kondensation für die Grundwasservermehrung überschätzt (S. 14). Vielfach ist bei einschlägigen Untersuchungen die Einwirkung des geologischen Baues und der Vorflutverhältnisse nicht hinreichend berücksichtigt worden. Ototzkys Behauptungen stehen durchaus im Widerspruch mit unseren Beobachtungen; ein Hochdrücken des Wasserstandes in den Rohren durch den Druck der durch Niederschläge belasteten Bodengase, wie er es annimmt, läßt sich nicht wahrnehmen. Dagegen lassen sich die Erscheinungen durch folgende Annahmen erklären:

Die Niederschläge erzeugen im Boden Haftwasser und Sickerwasser. Dies wirkt auf den Grundwasserspiegel ein mit einer Verzögerung, die zwischen etwa einer Stunde und einem Jahre schwankt, je nach den besonderen örtlichen Verhältnissen.

Die in die Tiefe jeweilig absickernde Wassermenge wird durch ein Wechselspiel von Niederschlag und Verdunstung auch von Frost und Tauwetter bestimmt. In den Monaten Oktober bis März ist die Verdunstung in der Regel gering und die in die Tiefe absickernde Wassermenge ist in erster Linie von den Niederschlägen abhängig. Ob ein Niederschlag als Schnee oder als Regen gefallen ist, hat dabei für den Zeitpunkt des Grundwasseranstieges Bedeutung, aber kaum für dessen Ausmaß.

In den Sommermonaten dagegen gewinnt die Verdunstung erhebliche Bedeutung für die jeweilige Menge des Sickerwassers, das in die Tiefe dringt. Bedeutungslos hierfür ist aber die Höhe der Niederschläge auch im Sommer nicht.

b) Grundwasser und Wasserwirtschaft (Zusammenfassung).

Die vorstehenden Darlegungen haben schon erkennen lassen, wie wichtig das Grundwasser für die gesamte Wasserwirtschaft ist. Es soll hier noch einmal in Kürze auf diese Beziehungen hingewiesen werden. Es gibt zahlreiche sandige, hochgelegene Gebiete, ähnlich dem Grunewald, die noch nicht von Wasserwerken in Anspruch genommen worden sind. Die Untersuchungen ermöglichen es, sich auch von diesen Zuständen, wie sie im Grunewalde ursprünglich vorlagen, ein klares Bild zu machen. Wir sehen, wie das Wasser, das dem Niederschlag entstammt, auf seinem unterirdischen Wege große Verzögerungen erleidet, die sich über viele Monate erstrecken. So ist das tiefliegende Grundwasser in beträchtlichem Maße befähigt, die Klimaschwankungen, die gefährlichen Feinde unserer Wasserwirtschaft, auszugleichen und selbst bei langdauernder Dürre einen gewissen Zufluß zu den größeren offenen Wasserläufen zu sichern. Auf die Verhältnisse bei flachliegendem Grundwasser, die wesentlich anders liegen, ist an einem Beispiel (Abb. 10) eingegangen worden.

Die Untersuchungen beim Teufelssee zeigen, wie ein Wasserwerk, das nur auf Grundwasserzufluß angewiesen ist, auf den Grundwasserstand wirkt, sich ein großes Zuflußgebiet tributpflichtig macht und so Wassermengen fördert, wie sie zur Versorgung mittlerer Städte ausreichen. Auf die Dauer lebt der Wasserwerksbetrieb nicht vom Grundwasservorrat, sondern von den Zuflüssen, die aus versickerten Niederschlägen stammen. Zur Versorgung moderner Großstädte mit ihrem ungeheuren Wasserbedarf reichen solche reinen Grundwasserwerke bei unseren Klima- und Bodenverhältnissen nicht aus. Da gilt es, die Flußläufe zu zwingen, daß sie in den Untergrund große Wassermengen abgeben.

Die Wasserwerksbetriebe haben zeitweise zu einer starken Beunruhigung der Oeffentlichkeit geführt und es sind Befürchtungen geäußert worden, die z. T. sehr übertrieben waren. Zur Durchführung einer geregelten Wasserwirtschaft müssen die Wasserwerke veranlaßt werden, daß sie ihre Förderzahlen den staatlichen Behörden zur freien Verwendung und Veröffentlichung bekanntgeben.

Daß die Ufer der offenen Gewässer nicht undurchlässig sind, zeigt deutlich der Schlachtensee. Man sieht hier, daß man einen Seespiegel, der ursprünglich eine Blänke des Grundwasserspiegels war, durch künstliche Wasserzufuhr halten und so alljährlich namhafte Grundwassermengen erzeugen kann.

Alle Zweige der ober- und unterirdischen Wasserwirtschaft stehen in innigster Wechselbeziehung zueinander; man kann nicht einzelne Teile herausgreifen, sondern muß das Ganze in seinen verwickelten und oft schwer zu entwirrenden Zusammenhängen überschauen können, das zeigt der Grunewald deutlich.

c) Grundwasser und Landeskultur.

Es ist bekannt, daß in vielen Fällen Absenkungen des Grundwasserstandes schwere Schädigungen von Wiesen, Baumbeständen und auch Ackerpflanzen hervorgerufen haben. Ein besonders lehrreiches Beispiel für Schädigung des Waldbestandes bildet der Naunhofer Staatswald bei Leipzig. Derartige Schädigungen können in der Weise vor sich gehen, daß die Pflanzen anfälliger gegen pflanzliche und tierische Schädlinge werden, die dann die Veranlassung zum Absterben werden, während die tiefere Ursache in der Austrocknung des Bodens liegt. Es lag daher für den Fernerstehenden nahe, das Absterben von Kiefernstämmen, das sich im Grunewalde im letzten Jahrzehnt in großem Umfange gezeigt hat, auf die Grundwasserabsenkung zurückzuführen. Eine genauere Untersuchung des Sachverhaltes ergibt aber ein anderes Bild. Zwar wissen wir noch sehr wenig über das Verhalten der Kiefer bei verschiedenem Grundwasserstand. Z. B. ergab ein Vergleich zwischen den Grundwasserständen und den Erfahrungen der Forstverwaltung über den Holzzuwachs in den verschiedenen Teilen der Forst Erkner keine deutlichen Beziehungen. Andererseits deuten doch manche Beobachtungen darauf hin, daß die Kiefern auf trockenem Sande dem Befall durch Schädlinge leichter ausgesetzt sind als in weniger trockenen Lagen. Ich möchte daher annehmen, daß es für die Kiefern im Sande vorteilhaft ist, wenn das Grundwasser in 1 bis 2 m, vielleicht auch 3 und 4 m Tiefe unter der Geländeoberfläche liegt. Wächter (38) fand eine Kiefernwurzel im Bürgerpark Pankow, die bis zu 3½ m tief hinabreichte, bezeichnet das aber als eine seltene Ausnahme, während Tiefen von etwa 2 m etwas gewöhnliches sind.*) Befindet das Grundwasser sich aber in Sandböden in wesentlich größeren Tiefen als 4 m, so ist eine Einwirkung auf den Kiefernbestand nicht anzunehmen. Nun liegt im weitaus größten Teile des Grunewaldes, wie die Schnitte (Tafel 2) zeigen, das Grundwasser sehr viel tiefer als 4 m unter der Geländeoberfläche. Es ist in solchen Fällen für den Wald ohne Einfluß, wenn das Grundwasser weiter abgesenkt wird.

Wenn das Absterben der Stämme auf den Wasserwerksbetrieb zurückzuführen wäre, so müßte man erwarten, daß es sich in der Nähe der Wasserfassungen am stärksten bemerkbar macht. Davon ist aber nicht das geringste zu bemerken. Die Landesanstalt wünschte nun vor allem eine zuverlässige Karte der Absterbebezirke zu besitzen, erhielt aber von der Forstverwaltung die Auskunft, daß eine solche nicht vorhanden und auch nur schwierig herzustellen sei. Es sind überhaupt nur wenige Gebiete vom Absterben verschont geblieben und diese Erscheinung greift immer weiter um sich. In wenigen Wochen können aus einem bisher lebenden Bestande eine größere Anzahl von Stämmen absterben.

---

*) Ein Plan der Landesanstalt für Gewässerkunde, im Grunewalde gemeinschaftlich mit der städtischen Forstverwaltung Wurzelausgrabungen vorzunehmen, konnte wegen verschiedener Schwierigkeiten nicht ausgeführt werden.

Nach einer Feststellung vom November 1920 hatten am wenigsten gelitten die Bestände bei der Krummen Lanke, dem Schlachtensee und in der Nähe der Wasserfassungen des Werkes Beelitzhof.

Gelitten haben nur die Kiefern; die Laubhölzer, die doch höhere Anforderungen an den Wassergehalt des Bodens stellen, sind gesund. Insbesondere zeigen junge Anpflanzungen von Buchen, Ahorn u. a. m. ein freudiges Wachstum.

Der Hauptteil der Kiefernbestände ist alt und war mancherlei Schädigungen ausgesetzt, z. B. durch Verdichtung der Bodendecke durch vieles Betreten und durch übermäßige Entziehung von Leseholz, das eine Verarmung des Bodens an Nährsalzen zur Folge hat. Durch diese wird die Fähigkeit des Bodens zur Krümelbildung beeinträchtigt und ebenfalls die Durchlüftung des Bodens herabgesetzt. Auch hat rohes Herunterreißen von Aesten durch Unbefugte Wunden an den Stämmen erzeugt, in denen sich der Schwamm festsetzen konnte. Eine Behandlung der Frage, inwieweit auch Rauchschäden in Frage kommen, würde hier zu weit führen.

Wesentlich anders als im Hauptteile des Grunewaldes liegen die Dinge bei den Niederungen, die auf der geologischen Karte deutlich hervortreten. An den Ufern der Seen sowie in den Mooren und ihren Randgebieten ist das Grundwasser von wesentlichem Einfluß auf die Pflanzenwelt. Diese Erscheinung hat große Bedeutung für die Botaniker, denen der Grunewald als Lehrgebiet für die Studierenden wertvoll ist. Die von der Landesanstalt für Gewässerkunde verfolgten und hier im Auszug veröffentlichten Wasserstandsänderungen bieten daher auch dem Botaniker Gelegenheit, Untersuchungen über den Einfluß des Grundwasserstandes auf die Flora anzustellen.

Der Grunewald gewährt die Möglichkeit, aus dem Untergrunde große Wassermassen zur Versorgung der benachbarten Teile der Großstadt zutage zu fördern, ohne daß dadurch der Landeskultur unmittelbar nennenswerter Schaden zugefügt wird (allerdings unter Beeinträchtigung der Wasserführung der Havel). Die Erhaltung der landschaftlichen Schönheiten des Gebietes, seine Eignung als Erholungsstätte, bleibt dabei jedoch nur dann erhalten, wenn geeignete Vorkehrungen zu diesem Zwecke getroffen werden, wie dies beim Schlachtensee mit Erfolg durch künstliche Haltung des Wasserspiegels geschehen ist.

Schrifttum.[1])

1. Veitmeyer, Vorarbeiten zu einer zukünftigen Wasserversorgung der Stadt Berlin. Berlin 1871 (Beschreibung des Grunewaldes auf S. 105). Fortsetzung dazu 1875, S. 75.

1a. Soyka, Die Schwankungen des Grundwassers mit besonderer Berücksichtigung der mitteleuropäischen Verhältnisse, Pencks geographische Abhandlungen, Bd. II, Heft 3. Wien 1888.

2. Wellmann, L., Das neue Brunnenwasserwerk zu Beelitzhof bei Wannsee. Gesundheitsingenieur. 1894, S. 174.

3. Berendt und Kaunhowen, Der tiefere Untergrund Berlins. Abh. geolog. Landesanstalt. N. F. Heft 28, 1897.

4. Piefke, Beiträge zur Hydrognosie der Mark Brandenburg. Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung, 1900, S. 305, 325, 350.

5. Buhle, Wasserstation auf Bahnhof Halensee. Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure, 1904, S. 454.

6. Havestadt und Contag, Der Bau des Teltowkanals. Zeitschrift für Bauwesen, 1906, S. 311—322, 467—482, Atlas Blatt 27 bis 29.

6a. — Der Teltowkanal und seine Umgebung. Extrabeilage zum Teltower Kreiskalender 1907.

7. Wahnschaffe, Gräber, Dahl und Potonié. Der Grunewald bei Berlin, seine Geologie, Flora und Fauna. Jena 1907.

8. Kaunhowen, Jahrbuch der Preußischen Geologischen Landesanstalt für 1906, S. 385, 386, 395. Berlin 1909.

9. Keilhack, Erläuterungen zur geologischen Spezialkarte, Blatt Teltow 1910.

10. Gräbner, Die Gefährdung der Flora der Grunewaldmoore, Mitteilungen der Brandenburgischen Provinzialkommission für Naturdenkmalpflege, Nr. 4. Berlin 1910.

11. Herzberg, Der Wasserspiegel der Grunewaldseen. Vossische Zeitung vom 12. Juni 1912, Nr. 351.

12. Keilhack, Lehrbuch der Grundwasser- und Quellenkunde. Berlin 1912. 2. Auflage 1917, S. 231, 232.

[1]) Durch die vorstehenden Nummern sind die angeführten Werke in den vorhergehenden Abschnitten gekennzeichnet.

13. — Ueber die Ursachen der Spiegelschwankungen der westlichen Grunewaldseen und Mittel zur Abhilfe. Zeitschrift für praktische Geologie 1912, S. 112.

14. König, Das Schwinden und Versumpfen von Seen durch die Wasserwerke Groß-Berlins? Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung. LV. 1912, S. 1179.

15. Wolff, W., Der Aufbau des norddeutschen Tieflandes mit besonderer Berücksichtigung des Grundwassers. Berlin 1912.

16. Hildebrandt, Der Kampf gegen die Grundwasserentziehung im Berliner Grunewalde. Hildebrandts Zentralblatt der Pumpenindustrie und Wassertechnik. Berlin, 11. Februar 1913. VI. Jahrgang, Nr. 5, S. 53.

16a. Burgemeister, Wassertechnik und Städtebau. Ebenda, S. 49.

17. Nuese, Die Gefährdung der Seen und Wälder um Berlin durch die übermäßige Absaugung des Grundwassers. Deutscher Verlag, Berlin 1913.

17a. Aird, Zur Wasserfrage um Groß-Berlin. Gesundheitsingenieur. Jahrgang 1913, Nr. 12.

18. Heilmann, Neuzeitliche Wasserversorgung in Gegenden starker Bevölkerungsanhäufungen in Deutschland. München und Berlin 1914.

19. Nitardy, Zur Biologie des Grunewaldsees bei Berlin. Mitteilungen der Landesanstalt für Wasserhygiene, Heft 19, 1914.

20. Keller, Ober- und unterirdische Wasserwirtschaft im Spree- und Havelgebiet. Als Handschrift gedruckt. Februar 1916.

21. Keilhack, Das Grundwasser im Grunewald. Vossische Zeitung vom 8. März 1916, Nr. 125.

22. Keller, Senkung und Auffüllung der Grunewaldseen. Durchlässigkeit der Seebetten. Zentralblatt der Bauverwaltung. 8. April 1916, S. 205—207.

23. Keilhack, Das Grundwasser im Grunewald. Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung. LIX. Jahrgang 1916, Nr. 17, S. 232—233 (Abdruck von Nr. 21).

24. Keller, Senkung und Auffüllung der Grunewaldseen. Durchlässigkeit der Seebetten. Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung 1916, S. 361—364.

24a. — Senkung und Auffüllung des Schlachtensees und der Krummen Lanke. 1917 (nicht veröffentlicht).

25. Koehne, W., Das Grundwasser in der Berliner Gegend in seinen Beziehungen zu den geologischen Verhältnissen. Internationale Zeitschrift für Wasserversorgung, 1. und 16. Dezember 1916, S. 181—183, 191—192.

26. — Ist gespanntes Grundwasser stets als artesisches zu bezeichnen? Internationale Zeitschrift für Wasserversorgung, 1. und 16. Juni 1918, S. 4—7.

27. — Die Grundwasserbeobachtungen der Landesanstalt für Gewässerkunde. Zentralblatt der Bauverwaltung 1918, S. 133—135.

28. Keller, Ober- und unterirdische Wasserwirtschaft im Spree- und Havelgebiet. Internationale Zeitschrift für Wasserversorgung, 5. Jahrg. 1918, Nr. 11/12 u. 13/14, S. 57.

29. Koehne, W., Beobachtung der Veränderungen des Grundwasserstandes. S. A. aus dem Jahrbuch der Deutschen Landwirtschaftsgesellschaft für 1919, Berlin 1920.

30. v. Nathusius, Die Bedrohung und Erhaltung des Dauerwaldes bei Groß-Berlin. IX. Jahreskonferenz für Naturdenkmalspflege in Berlin. Die Naturwissenschaften, Heft 7, 13. November 1920, S. 133.

31. Koehne, W., Das Grundwasser im Teltow. Teltower Kreiskalender für 1922.

32. Penck, Albert, Eine Exkursion in den Grunewald, veranstaltet in der erdkundlichen Woche vom 28. Juni 1918.

33. Bindemann, Die Verdunstungsmessungen der Preußischen Landesanstalt für Gewässerkunde auf und an dem Grimnitzsee und am Werbellinsee bei Joachimsthal in der Uckermark. Jahrbuch für die Gewässerkunde Norddeutschlands, Besondere Mitteilungen, Band 3, Nr. 3. Berlin 1921.

34. Hellmann, Elsner, Henze und Knoch, Klima-Atlas von Deutschland. Berlin 1921.

35. Hellmann, Das Klima von Berlin. I. T. Niederschläge, Gewitter. Abhandlung des Preußischen Meteorologischen Institutes, Bd. I, Nr. 4. Berlin 1891.

36. Hellmann, Elsner, Schwalbe, Das Klima von Berlin. II. T. Lufttemperatur, ebenda. Bd. III, Nr. 6. 1910.

37. Koehne, W., Die Ursachen der Grundwasserstandschwankungen. Sonderdruck aus „Deutsche Wasserwirtschaft“, 1924, Heft 7.

38. Wächter, Das Wurzelwachstum der Pflanzen unter besonderer Berücksichtigung der Grundwasserverhältnisse. Mitteilungen der Landesanstalt für Wasserhygiene, Heft 21, 1916. Heft 26, 1921.

Schienenkopf und Radreifen.

Kräftewirkungen und Gestaltung des Querschnittes.

Vom Ingenieur Dr. **R. Hanker** in Wien.

I. Uebersicht.

Der Radreifen hat auf Hauptbahnen seit langem die durch die Technischen Vereinbarungen des Vereines deutscher Eisenbahnverwaltungen vorgeschriebene Form, die sich auf Grund langjähriger Erfahrungen als günstig erwiesen hat, es fehlt aber in dem bezüglichen Schrifttum eine allgemein anerkannte Begründung für diese Form. Im Zusammenhange mit dem Querschnitte des Radreifens werden von den Technischen Vereinbarungen auch die Halbmesser der mit dem Rad in Berührung kommenden Teile des Schienenkopfes empfohlen bzw. vorgeschrieben. Ueber die seitlichen Begrenzungsflächen des Schienenkopfes finden sich keine Bestimmungen; sie werden beinahe ausnahmslos gleichlaufend zur lotrechten Schwerachse gemacht. Bei allen Neuentwürfen von Oberbauarten und Gleisverbindungen werden die erwähnten Maße als unverrückbare Festwerte angesehen und als solche gehandhabt. In früheren Entwicklungsjahren des Eisenbahnwesens waren diese Maße jedoch noch Veränderungen unterworfen und gaben Anlaß zu Abhandlungen, die diese Maße hinsichtlich ihrer Zweckmäßigkeit wissenschaftlich prüfen sollten.

Eisenbahndirektor A. Wöhler[1]) versuchte nachzuweisen, daß walzenförmige Radlaufflächen den kegelförmigen vorzuziehen seien, und schlägt eine besonders ausgebildete Hohlkehle des Radreifens vor, wodurch der Krümmungswiderstand herabgesetzt und der Stoffverschleiß günstiger gestaltet werden sollte. Die in seinen sehr zu beachtenden Ausführungen angegebenen Maße konnten deshalb nicht zu Festwerten werden, weil Versuche zeigten, daß der Stoffverschleis durch die vorgeschlagene Form nicht herabgesetzt worden war. In jüngster Zeit hat Professor R. Findeis[2]) die Frage der Gestaltung des Schienenkopfes neuerlich angeregt, fordert die Festlegung des Neigungswinkels der Radflanschen und tritt für die Neigung der Seitenflächen des Schienenkopfes ein.

In folgendem sollen auf Grund der Kräftewirkungen zwischen Rad und Schiene Grenzen für den Neigungswinkel des Radflansches angegeben und gezeigt werden, daß die Neigung der Seitenflächen des Schienenkopfes nicht nur hinsichtlich der Abnützung von Rad und Schiene und der damit in Zusammenhang stehenden Herabsetzung des Krümmungswiderstandes, sondern auch hinsichtlich der Gefahr des Aufsteigens der Räder günstiger ist als die jetzt gebräuchliche Form des Schienenkopfes.

Dabei sollen zur größeren Uebersichtlichkeit langwierige mathematische Ableitungen vermieden und durch folgerichtig aufgebaute Schlüsse ersetzt werden, selbst wenn dadurch die oft recht verwickelten Abwälzungsvorgänge nicht vollkommen scharf erfaßt, also die Genauigkeit der Rechnungsergebnisse leiden würden. Auf die aus diesen Rechnungsergebnissen gezogenen Schlußfolgerungen wird dieser Umstand keinen Einfluß haben, weil die zufälligen, sich der Rechnung entziehenden Kräftewirkungen zwischen Rad und Schiene und die Unsicherheit in der Wahl des Reibwertes „f" die Berechnung absolut richtiger Zahlenwerte ohnehin unmöglich machen und Vergleichsziffern an Wert gewinnen, wenn die Durchsichtigkeit der Rechnungsvorgänge das Ueberblicken der Zusammenhänge erleichtert.

II. Die angreifenden Kräfte.

Bei der Fahrt in der Geraden treten größere Seitenkräfte zwischen Rad und Schiene nur durch die Ungenauigkeiten der Gleislage, den Spielraum der Achssätze im Gleis und die damit verbundenen Schlingerbewegungen der Fahrzeuge auf. Bei größeren Fahrgeschwindigkeiten erreichen diese Kräfte zwar bedeutende Werte, sind aber wegen des zufälligen Auftretens der Ungenauigkeiten rechnungsmäßig nicht zu erfassen. In Krümmungen treten außer diesen zufälligen Kräften noch solche Kräftewirkungen zwischen Rad und Schiene hinzu, die rechnerisch nachweisbar und bei kleinen und mittleren Geschwindigkeiten von ausschlaggebender Bedeutung sind, da erfahrungsgemäß die seitliche Abnützung der Schienen in Bogen bei weitem größer ist als in der Geraden. Es werden daher die Seitenkräfte bei der Fahrt durch Krümmungen untersucht werden.

[1]) „Ueber den Einfluß der Form des Schienenkopfes und der Radreifen auf deren gegenseitige Abnützung und auf die Bewegung und „Ueber die Beziehungen zwischen Schienenkopf und Radreifender Eisenbahnfahrzeuge", Zeitschrift für Bauwesen 1859, S. 360; profil", Zentralblatt der Bauverwaltung 1881, S. 181 und 1884, S. 177.

[2]) „Gedanken über die Form des Schienenkopfes", Verkehrstechnische Woche 1922, S. 230.

II. A) Fliehkraft.

Zum Zustandekommen einer krummlinigen Bewegung vom Krümmungshalbmesser R muß auf den Schwerpunkt des Fahrzeuges eine Zentripetalkraft wirken von der Größe

$$\Phi = \frac{Q \cdot v^2}{g \cdot R},$$

wenn Q das Gewicht des Fahrzeuges in kg, v die Geschwindigkeit der Fahrt in m/sek und g die Erdbeschleunigung in m/sek² bedeutet. Von der Bogenaußenseite müssen auf die Räder des Fahrzeuges Kräfte wirken, deren Summe Φ gleichkommt. Bei Straßenfahrzeugen werden diese Kräfte lediglich durch die Reibung zwischen Rad und Fahrbahn geleistet, während bei Eisenbahnfahrzeugen die Bogenaußenschiene auch durch die Spurkränze Seitenkräfte ausüben kann. Mit den gleichen und entgegengesetzt gerichteten Kräften drücken die Räder als Gegenwirkung nach der Bogenaußenseite. Ist die Fahrzeuglast auf die einzelnen Achsen der Fahrzeuge gleichmäßig verteilt und wird mit G in kg eine Achslast bezeichnet, dann drückt jede Achse mit der Fliehkraft

$$F = \frac{G \cdot v^2}{g \cdot R} \quad (1)$$

gegen die Bogenaußenseite (Abb. 1).

II. B) Lenkkraft.

Bei Straßenfahrzeugen wird das Fahren in Bogen dadurch erzielt, daß entweder die Vorderachse um ihren Mittelpunkt gedreht, oder daß wie bei Kraftfahrzeugen die beiden Achsstummel um einen Winkel ω geschwenkt werden (Abb. 2). Es rollen dann sämtliche vier Räder des Fahrzeuges, die auf den Achsen unabhängig voneinander frei drehbar sind, ohne zu gleiten ab, und das Fahrzeug beschreibt dabei einen Bogen vom Halbmesser R. Aus Abb. 2 lassen sich die Beziehungen zwischen ω, R und dem Achsstand a ablesen. Bei fortschreitender Bewegung um den Weg ds gelangt die Hinterachse des Fahrzeuges von AB nach $A'B'$ und die Vorderachse von CD nach $C'D'$. Dabei hat es sich um den Winkel $d\varphi$ gedreht und einen Bogen vom Halbmesser R beschrieben. Aus Dreieck $AA'O$ ergibt sich

$$ds = R \cdot d\varphi,$$

und aus Dreieck $A'CC'$

$$\frac{\sin d\varphi}{\sin \omega} = \frac{ds}{a}.$$

Daraus folgt

$$R = a : \sin\omega, \text{ da } \sin d\varphi = d\varphi \text{ ist.}$$

Bei Eisenbahnfahrzeugen wird die Lenkung dadurch bewirkt, daß die Bogenaußenschiene das anlaufende Vorderrad seitlich verschiebt. Die Vorderachse legt somit den Weg CF rein abrollend und den Weg FC' rein gleitend zurück. Aus Dreieck CFC' ist

$$CF = ds \cdot \sin\omega.$$

Der Unterschied zwischen dem Winkel ω' und dem Winkel ω, welch letzterer gegenüber der Längsachse des Fahrzeuges immer den gleichen Wert behält, ist gleich Null, weil das Fehlerdreieck $CC'E$ unendlich klein zweiter Ordnung ist.

Die auf dem Wege FC' zu leistende Reibungsarbeit ist

$$dA = G \cdot f \cdot ds \cdot \sin\omega \quad (2)$$

wenn f der Reibwert der gleitenden Reibung zwischen Radreifen und der Fahrfläche des Schienenkopfes bedeutet. Daraus folgt die

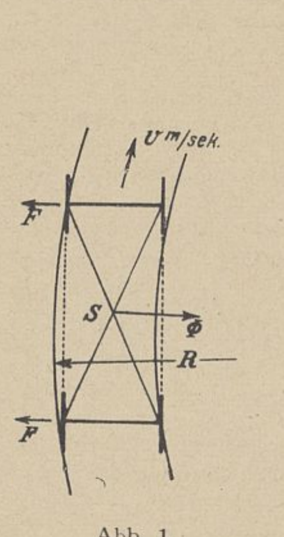


Abb. 1.

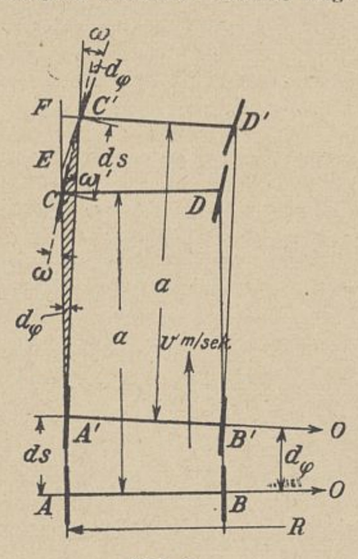


Abb. 2.

von der Schiene auf das äußere Vorderrad zu übertragende Kraft, kurz Lenkkraft L genannt, mit

$$L = \frac{dA}{ds \cdot \sin\omega} = G \cdot f. \quad (3)$$

Sie ist somit von R und a unabhängig, so lange die Hinterachse frei abrollen kann, die bestrebt ist, in der Richtung des Bogenhalbmessers zu stehen, wie sich aus Textabbildung 2 ergibt und wie schon Wöhler durch einen anderen Gedankengang festgestellt hat. (Abb. 3.)

Die Arbeit zur Verschiebung der Vorderachse dA, Gl. (2), hat die Lokomotive auf dem Wege ds zu leisten, daher ist die Vermehrung der Zugkraft

$$\frac{dA}{ds} = G \cdot f \cdot \sin\omega = G \cdot f \cdot \frac{a}{R}.$$

Jener Teil des Krümmungswiderstandes in kg/t, der zur Verschiebung der Vorderachse nach der Bogeninnenseite gehört, ist mithin für ein zweiachsiges Fahrzeug mit dem Gesamtgewicht $Q = 2G$

$$w_L = \frac{G \cdot f \cdot a}{2 \cdot G \cdot R} \cdot 1000 = \frac{f \cdot a}{2 \cdot R} \cdot 1000 \quad (4)\ [3]$$

Abb. 3.

Dieser Widerstand ist lediglich darauf gegründet, daß die beiden Achsen des Fahrzeuges gleichgerichtet sind und bleiben, und es wäre gleichgültig, ob das Fahrzeug frei auf den Achsen sitzende Räder hätte oder nicht. Ebenso würde dieser Widerstand auftreten, auch wenn das Fahrzeug nicht durch Spurkränze, sondern durch eine andere Kraft gezwungen würde, einen Bogen vom Halbmesser R zu beschreiben. Weiter sind jetzt und in den folgenden Untersuchungen walzenförmige Radreifen zugrundegelegt. Auf die durch die jetzt übliche Kegelform der Radreifen bedingten Abweichungen von den Rechnungsergebnissen wird an geeigneter Stelle hingewiesen werden.

Während also die Lenkkraft L von a und R unabhängig ist, wächst der Krümmungswiderstand w_L mit dem Achsstand a und mit der Krümmung $K = 1 : R$.

Die Möglichkeit der Einstellung der Hinterachse in die Richtung des Bogenhalbmessers hängt von den Abmessungen des Fahrzeuges und des Gleises ab. Bezeichnet s die Spurweite, s_a das Spurmaß, $e = s - s_a$ den Spielraum des Achssatzes im Gleis, so läuft das innere Hinterrad die Innenschiene berührend an, wenn nach Abb. 3

$$e = a^2 : 2R \quad (5)$$

Ist der Spielraum e größer als dieser Wert, dann läuft die Hinterachse frei durch das Gleis in der Stellung AB (Abb. 4), ist der Spielraum kleiner, dann läuft die Hinterachse bei dem Bestreben, sich in die Richtung des Bogenhalbmessers einzustellen, gegen die Innenschiene an (Abb. 5). Sie läuft nicht mehr frei, sondern wird ebenso wie die Vorderachse mit der Kraft $L' = G \cdot f$ gegen die Innenschiene gedrückt, weil sie von dieser seitlich verschoben werden muß. Der augenblickliche Drehpunkt des Fahrzeuges liegt im ersten Falle in D_1 in der Hinterachse, im zweiten Falle zwischen den beiden Achsen in D_3. Wenn keine anderen Kräfte auf das Fahrzeug wirken würden, müßte es sich in den angegebenen Stellungen durch den Bogen bewegen. Dabei schließen die Radebenen der führenden Räder mit der Berührenden an den Gleisbogen folgende Winkel ein:

φ_1 Anlaufwinkel des führenden Vorderrades an der Außenschiene,

φ_2 Anlaufwinkel des Hinterrades an der Innenschiene.

Aus Abb. 5 ergibt sich

$$\varphi_1 = \psi_1 + \psi_2 = \frac{a}{2R} + \frac{e}{a} \quad (6)$$

$$\varphi_2 = 2\psi_1 - (\psi_1 + \psi_2) = \frac{a}{2R} - \frac{e}{a} \quad (7)$$

Aus Abb. 4 ergibt sich bei der Stellung der Hinterachse AB, wie sie dem freien Abrollen entspricht

$$\varphi_1 = 2\psi_1 = a : R \quad (8)$$
$$\varphi_2 = 0 \quad (9)$$

(Die Hinterachse läuft an der Innenschiene nicht an.)

Kräftewirkungen, insbesondere die, welche durch Unregelmäßigkeit der Gleisanlage hervorgerufen werden, können bewirken, daß die Hinterachse auch in die Stellung $A'B'$ kommt, wodurch φ_1 den Wert der Gleichung (6) annimmt. Bei kleinen Achsständen und großem Spielraum e kann φ_1 vergleichsweise große Werte annehmen und da, wie später gezeigt werden wird, der Krümmungswiderstand mit der Größe von φ_1 wächst, erklärt sich der vergleichsweise hohe Krümmungswiderstand von Drehgestellen, wenn sie in einem Gleis mit zu großer Spurerweiterung laufen. Der Krümmungswiderstand solcher Wagen mit kurzem Achsstand wird um so mehr vergrößert, als auch der augenblickliche Drehpunkt bei Einstellung der Hinterachse nach $A'B'$ außerhalb der beiden Achsen gegen D_2 rückt, so daß, weil auch die Hinterachse seitlich verschoben werden muß, Gleichung (4) lautet:

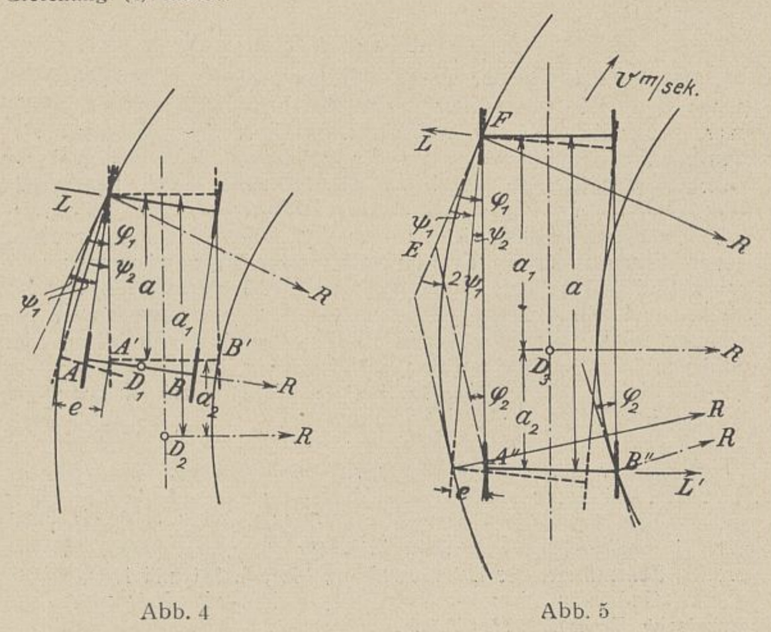


Abb. 4 Abb. 5

[3]) Der Krümmungswiderstand und alle damit in Zusammenhang stehenden Größen bildeten seit langem Gegenstand weitreichender Erörterungen. Es folgen die dem Verfasser bekannt gewordenen Veröffentlichungen auf diesem Gebiet:

1. Baum: „Schiene und Radreifen". Glasers Analen für Gewerbe und Bauwesen (Gl. A.), 1916, Nr. 938, S. 27.

2. Boedecker: a) Die Wirkungen zwischen Rad und Schiene, Hannover 1878; b) Die Fahrkante der Schienen, die Hohlkehle der Radreifen und der Bogenwiderstand steifachsiger Eisenbahnfahrzeuge. Zentralblatt der Bauverwaltung 1914, S. 514; c) Die augenblickliche Drehachse bei der Bewegung der Eisenbahnfahrzeuge in Bogen. Organ 1915, S. 21; d) Der Bogenwiderstand steifachsiger Eisenbahnwagen. Z. Bl. D. B. V. 1915, S. 54 und S. 618; e) Der Bogenwiderstand steifachsiger Eisenbahnwagen. Z. Bl. d. B. V. 1916, S. 353.

3. Große: „Ueber Massenaufnahme von Radreifenquerschnitten und Abnützung von Radreifen". Gl. A. 1887, Nr. 249, S. 163.

4. Helmboth: „Die Ursachen der Abnützung von Spurkränzen und Schienen in Bahnkrümmungen". Zeitschrift des Vereins deutscher Ing. 1888.

5. Hausmann: „Ueber Radlaufflächen bei Straßenbahnen, Beiträge zur Frage der Beziehung zwischen Fahrzeug und Gleis bei Straßenbahnen". Gablonz, 1913 und 1914, im Selbstverlag d. Verf.

6. Krieger: „Die Kegelform der Radreifen der Eisenbahnfahrzeuge als Ursache der Zugwiderstände und des Wanderns der Schienen". Organ 1886, S. 132.

7. Mackenzie: „Der Kurvenwiderstand in Eisenbahngleisen, ein Moment der Gefahr". Vortrag, gehalten in der Institution of Civil-Engineers in London, Gl. A., 1884, Nr. 157, S. 7.

8. Ruegger: „Betrachtungen über die störenden Nebenwirkungen der Eisenbahnfahrzeuge mit besonderer Berücksichtigung der Radreifenkonozität". Schweizerische Bauzeitung 1917, Bd. 69, S. 271.

9. Sanzin: „Der Widerstand der Eisenbahnfahrzeuge". Oesterr. Wochenschrift f. d. öffentl. Baudienst 1917, S. 433.

10. Schlöß: „Ueber den Lauf steifachsiger Fahrzeuge durch Bahnkrümmungen", und Erwiderung darauf von Heumann, Organ, 1912, S. 50; S. 257. Organ, 1913, S. 254.

11. Uebelacker: „Untersuchungen über die Bewegung von Lokomotiven mit Drehgestellen in Bahnkrümmungen". Organ, 1903, Beilage.

Die gründlichste Bearbeitung dieses Gegenstandes findet sich bei Boedecker, wo die Abwälzungsvorgänge zwischen Rad und Schiene am weitesten verfolgt werden. Es lassen sich in seinen Veröffentlichungen die im Laufe der Zeit immer tiefer eindringenden Erkenntnisse deutlich verfolgen. Die Genauigkeit, mit der die vielen sich übergreifenden Vorgänge im Zusammenhang behandelt werden, erschwert jedoch sehr die Uebersicht und behindert dadurch das Ziehen letzter Schlußfolgerungen. Im Gegensatz hierzu sollen in der vorliegenden Arbeit die Abwälzungsvorgänge in ihre Einzelteile zerlegt und dadurch einfachere und doch das Wesen erfassende Beziehungen geschaffen werden, die es ermöglichen sollen, weiteren Kreisen den Gegenstand näher zu bringen und das mühevolle Erarbeiten der Gedankengänge in vorstehenden Veröffentlichungen zu erleichtern.

$$w = \underbrace{\frac{f \cdot a_1}{2R} \cdot 1000}_{\text{Anteil der Vorderachse}} + \underbrace{\frac{f \cdot a_2}{2R} \cdot 1000}_{\text{Anteil der Hinterachse}} = \frac{f \cdot (a_1 + a_2)}{2R} \cdot 1000 \quad (4a)$$

Da nach Abb. 4 $a_1 + a_2 > a$ ist, wächst also der Krümmungswiderstand, wenn der augenblickliche Drehpunkt des Wagens außerhalb der Achsen fällt, während der Wagen in der Stellung nach Abb. 5 hinsichtlich w_L keine Vergrößerung des Krümmungswiderstandes erfährt (im Vergleich zu Abb. 3), da $a_1 + a_2 = a$ ist.

Aus Vergleichen der Abb. 3 bis 5 ergibt sich weiter, daß ein Fahrzeug eine Krümmung dann mit den geringsten Widerständen befährt, wenn es sich in der Stellung Abb. 3 befindet, denn dann ist φ_2 aus Gleichung (7) und (9)

$$\varphi_2 = \frac{a}{2R} - \frac{a}{2R} = 0,$$

die Hinterachse rollt also noch frei, und der Winkel φ_1 kann im Gegensatz zu Abb. 4 nicht größer werden als $a : R$. Bei Festsetzung des Einflusses von φ_1 und φ_2 auf die Größe des Krümmungswiderstandes wird dies noch näher beleuchtet werden.

Bis jetzt wurde vorausgesetzt, daß das Fahrzeug ein steifachsiges sei, das heißt, daß die Vorderachse und die Hinterachse immer gleich gerichtet bleiben. Ist ein Fahrzeug mit Lenkachsen ausgestattet, dann sind die Achsen befähigt, sich in die Richtung des Bogenhalbmessers einzustellen. Bei freien Lenkachsen wirkt dieser Einstellung die Rückstellkraft, welche die schrägen Gehänge ausüben, entgegen, so daß die vollständige Einstellung nie ganz erreicht werden kann. Es bleibt jedenfalls ein Anlaufwinkel $\varphi > 0$ bestehen (Abb. 6), der aber zumeist kleiner sein wird als φ_1 [4]). Unter der Annahme, daß $\varphi < \varphi_1$ sei, wird auch w_L kleiner, und zwar in dem Maße, wie $\omega - \varphi$ (Abb. 2) kleiner wird. Denn der Weg, den das Rad jetzt gleitend zurücklegen muß, ist nun nicht mehr $ds \cdot \sin \omega$, sondern $ds \cdot \sin(\omega - \varphi)$ und der Krümmungswiderstand w_L wäre gleich Null, wenn $\omega = \varphi$, d. h. vollkommene Einstellung der Achsen möglich wäre.

Hat ein Fahrzeug mehr als zwei Achsen, so ist zunächst zu unterscheiden, ob die Achsen (es sollen zunächst drei behandelt werden) unverschieblich in einem steifen Rahmen gelagert sind, oder ob die Mittelachse seitlich verschiebbar ist. Im ersten Falle kann die Stellung des Fahrzeuges eine solche sein, wie Abb. 7 zeigt, die Lenkkraft L ist dann, gleichgültig ob die Spurweite s oder größer als s wäre,

$$L = \underbrace{G \cdot f}_{\text{Anteil der 1. Achse}} + \underbrace{G \cdot f \cdot \frac{b}{a}}_{\text{Anteil der 2. Achse}},$$

da sich die Seitenkraft $G \cdot f$, mit der die Mittelachse zu verschieben ist, im Hebelverhältnis $b : a$ auf die äußere Schiene überträgt. Dabei ist es wieder gleichgültig, ob der augenblickliche Drehpunkt in der dritten Achse oder zwischen den Achsen liegt, was von der Belastung der zweiten und dritten Achse abhängt. Bei gleicher Belastung würde der augenblickliche Drehpunkt in $b/2$ liegen, da bei dem Bestreben der zweiten und dritten Achse, sich in die Richtung des Bogenhalbmessers einzustellen, beide Achsen bei dem entgegengesetzt gerichteten Drehbestreben in der Halbstellung ins Gleichgewicht kommen würden.

Aber auch dann wäre

$$L = \underbrace{G \cdot f}_{\text{1. Achse}} + \underbrace{G \cdot f \cdot a : b/2}_{\text{2. Achse}} + \underbrace{G \cdot f \cdot a : b/2}_{\text{3. Achse}} = L = G \cdot f \left(1 + \frac{b}{a}\right) \quad (10)$$

Ist das Verhältnis der Fahrzeugabmessungen zum Gleis aber so wie Abb. 8 zeigt (Grenzstellung), wo das innere Rad der zweiten Achse an der Innenschiene anläuft, dann muß die dritte Achse, die nun nicht mehr an der Innenschiene anlaufen kann, durch die erste Achse verschoben werden, der augenblickliche Drehpunkt liegt in der zweiten Achse, und bei gleichen Achsständen erfolgt die Druckübertragung im Hebelverhältnis 1 : 1, wodurch die Lenkkraft

$$L'' = 2\,G \cdot f \quad (11)$$

wird.

Wie spätere Zahlenbeispiele zeigen, ist dies bei der jetzt gebräuchlichen Form des Radreifens bereits ein gefährlicher Zustand, man ist sich dessen auch stets bewußt gewesen, und zahlreich waren die Vorschläge, die mittlere Achse ohne Spurkranz auszuführen, um ein Anlaufen der Mittelachse an der Innenschiene auf jeden Fall zu verhindern. Aus Abb. 8 ergibt sich die Bedingung für das Anlaufen des mittleren Rades durch die Gleichung

$$\left(\frac{3a}{4}\right)^2 = \left(e + \frac{a^2}{32 \cdot R}\right) \cdot 2R,$$

daraus folgt, daß die Gefahr des Anlaufens der Mittelachse besteht, wenn der Spielraum

$$e < \frac{a^2}{4R} \quad (12)$$

Mit den Bezeichnungen der Abb. 7 ergibt sich ähnlich wie für ein zweiachsiges Fahrzeug der Krümmungswiderstand w_L aus

$$dA = G_1 f \cdot ds \sin\omega + G_2 f ds \cdot \frac{b}{a} \sin\omega$$

$$\frac{dA}{ds} = G_1 f \cdot \frac{a}{R} + G_2 f \cdot \frac{a \cdot b}{a \cdot R} = \frac{f}{R}(G_1 a + G_2 b)$$

$$w_L = \frac{f}{R \cdot Q}(G_1 \cdot a + G_2 \cdot b) \cdot 1000 \quad (4b)$$

wenn Q das Gesamtgewicht des Fahrzeuges $G_1 + G_2 + G_3$ bezeichnet.

Die Lenkkraft L kann wesentlich verkleinert werden, wenn die Mittelachse seitlich verschiebbar ist. Bei vergleichsweise kleinen Achsständen wird das Fahrzeug den Bogen durchlaufen, wie Abb. 9 zeigt. Die Mittelachse, die sich der Verschiebung nach innen mit der Kraft $G \cdot f$ widersetzt, wird an die Außenschiene gedrückt und nun von dieser verschoben, wodurch die erste Achse seitlich entlastet wird. Die Lenkkraft L ist in diesem Falle:

$$L = G \cdot f + \frac{K}{2} \quad (13)$$

wenn mit K die Rückstellkraft bezeichnet wird, welche die Mittelachse in ihre Grundstellung zu bringen versucht. Die Mittelachse verschiebt sich jetzt selbst im Gegensatze zu Abb. 7, und die Mittelachse drückt mit der Kraft $L''' = G \cdot f - K$ gegen die Außenschiene. Da die Rückstellkraft wesentlich kleiner ist als $G \cdot f$, sind die Werte für L aus Gleichung (13) kleiner als aus Gleichung (10), das Durchfahren der Krümmungen also weniger gefährlich und mit einem geringeren Krümmungswiderstand verbunden.

Bei vergleichsweise großen Achsständen wird sich das Fahrzeug nach Abb. 10 durch den Bogen bewegen. Die dritte Achse kann jetzt entgegen Abb. 8 die Innenschiene anlaufen und wird von dieser verschoben, so daß wieder die erste Achse seitlich entlastet wird. Die Lenkkraft in der ersten Achse rechnet sich wieder nach Gleichung (13), da die Rückstellkraft K im Verhältnis $K : 2\,G \cdot f$ auf die erste Achse zur Wirkung kommt. Es folgt dies aus der Ueberführung der Verhältnisse von Abb. 8 nach Abb. 10: beim Fahrzeug mit steifen Rahmen wird die Mittelachse mit der Kraft $L'' = 2\,Gf$ gegen die Innenschiene gedrückt und überträgt die Kraft $G \cdot f$ von der dritten Achse auf die erste. Wirkt also nur die Kraft K gegen die Innenschiene, so ist die übertragene Kraft

$$G \cdot f \cdot \frac{K}{2Gf} = \frac{K}{2},$$

so daß also auch für Abb. 10 die Gleichung (13) gilt.

Daraus läßt sich erkennen, daß für lange dreiachsige Fahrzeuge die Verschiebbarkeit der Mittelachse unbedingt erforderlich ist wegen der Gefahr des Aufsteigens der Räder der ersten Achse, daß aber auch bei kleinen Achsständen (dreiachsige Drehgestelle) die Ver-

[4]) Der Wert von Lenkachsen wird von manchen Verfassern bestritten, und Versuche sollen auch gezeigt haben, daß unter Umständen auch entgegengesetzte Einstellung der Achsen, also $\varphi > \varphi_1$ eintreten kann.

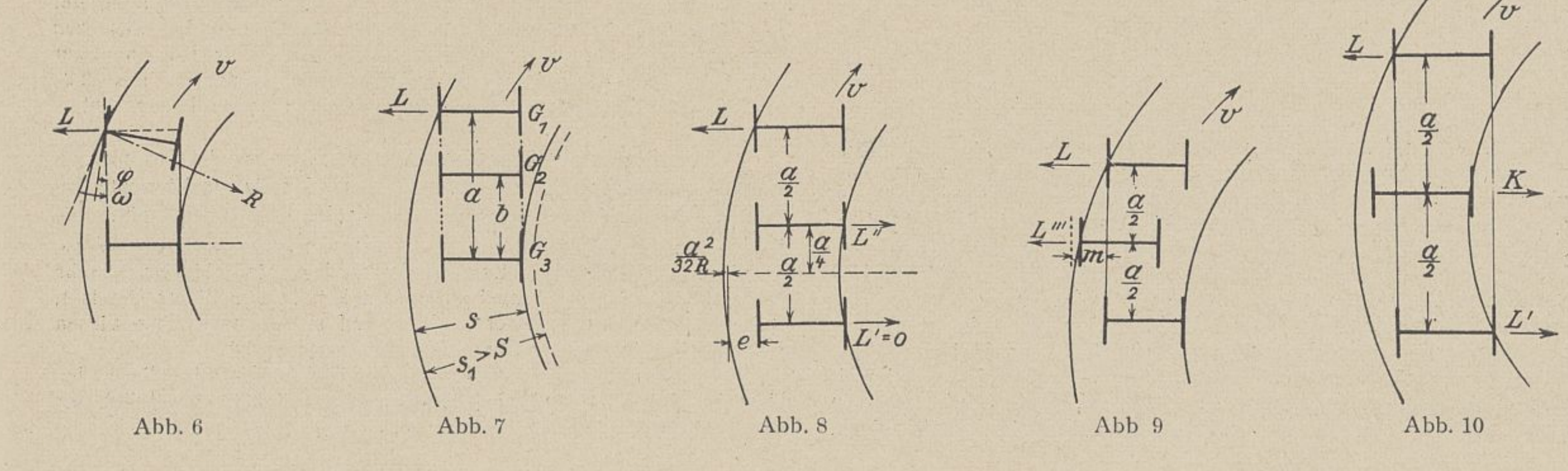


Abb. 6 Abb. 7 Abb. 8 Abb 9 Abb. 10

schiebbarkeit der Mittelachse (Abb. 9) für das Durchfahren der Krümmungen des Krümmungswiderstandes wegen von Vorteil ist. Dabei soll die Verschiebbarkeit der Mittelachse wenigstens

$$m = a^2 : 8R$$

betragen, damit das Anlegen der Mittelachse an die Außenschiene mit Sicherheit gewährleistet ist.

Sind die Fahrzeuge außerdem mit Lenkachsen ausgestattet, was meistens der Fall ist, so treten die gleichen Beziehungen zwischen Einstellwinkel und Krümmungswiderstand auf, wie bei zweiachsigen Fahrzeugen mit Lenkachsen erörtert wurde.

Mehr als drei Achsen in steifem Rahmen sollten nicht vorkommen, da dann die Lenkkraft so große Werte annehmen kann, daß die Gefahr des Aufsteigens der Räder nahe rückt. Vierachsige Wagen haben zumeist Drehgestelle,[5]) wovon jedes sich wie ein zweiachsiges Fahrzeug verhält. Zur Lenkkraft L eines zweiachsigen Wagens kommt noch die Kraft hinzu, welche das Drehgestell um den Drehzapfen zu bewegen hat. Da das Hebelverhältnis von angreifender und widerstehender Kraft ein sehr großes ist, wird die Erhöhung von L nur ganz geringfügig sein.

Lokomotiven mit mehr als drei Achsen haben eine oder mehrere verschiebbare Achsen, zumeist außerdem führende Drehgestelle oder Adamsachsen, so daß die Lenkkraft auf zwei oder mehrere Achsen verteilt wird.

II. C) Rollzwangkräfte.

Die beiden Räder eines Achssatzes sind fest auf der Achse aufgekeilt, bilden mit ihr ein einheitliches Ganzes, stehen daher unter einen gegenseitigen Rollzwang, d. h. sie müssen stets gleich schnell abrollen. Bei gleichem Raddurchmesser können daher beide Räder nur gleiche Wege zurücklegen und müssen teilweise gleiten, wenn sich wie in Krümmungen ein Wegunterschied ergibt. Beim Fortschreiten eines zweiachsigen Fahrzeuges um den Weg ds (Abb. 11) legt ein Außenrad, walzenförmige Reifen vorausgesetzt, den Weg

$$\left(R + \frac{s_r}{2}\right) \cdot d\varphi$$

und ein Innenrad den Weg

$$\left(R - \frac{s_r}{2}\right) \cdot d\varphi$$

zurück, wenn s_r die Entfernung der Rollkreise bedeutet. Der Wegunterschied beträgt $s_r \cdot d\varphi$. Diese Strecke muß das jeweils weniger belastete Rad eines Achssatzes gleitend zurücklegen, und zwar gleitet das Außenrad in der Fahrrichtung, das Innenrad entgegengesetzt zur Fahrrichtung. Dadurch entstehen Drehmomente M von der Schiene auf den Achssatz wirkend, wie Abb. 11 zeigt. Die Größe der Reibungskraft R_z' wird wieder aus einer Arbeitsgleichung gefunden:

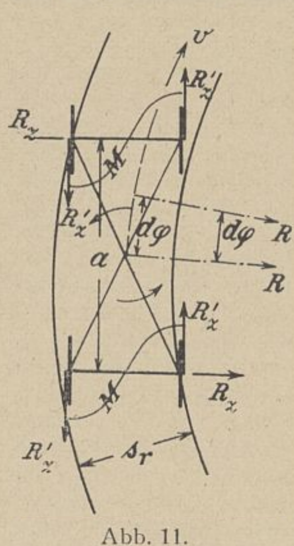


Abb. 11.

Die Arbeit der gleitenden Reibung auf dem Weg $s_r \cdot d\varphi$ ist

$$dA = s_r \cdot d\varphi \cdot \frac{G}{2} \cdot f,$$

wo $G:2$ die Radlast des gleitenden Rades bedeutet und mit der halben Achslast angenommen wird.

Aus $ds = R \cdot d\varphi$ ergibt sich

$$dA = \frac{s_r \cdot G}{R \cdot 2} \cdot f \cdot ds$$

mithin die Kraft R_z', da sie in der Richtung ds wirkt

$$R_z' = \frac{dA}{ds} = \frac{s_r \cdot G}{R \cdot 2} \cdot f \quad (14)$$

Das Moment M, das den Achssatz zu drehen versucht, ist demnach:

$$M = R_z' \cdot s_r = \frac{s_r^2 \cdot G}{R \cdot 2} \cdot f.$$

Das gleiche Drehmoment wirkt durch den zweiten Achssatz[6]) auf das Fahrzeug, in der angegebenen Pfeilrichtung drehend, so daß dieses mit den Kräften R_z gegen die Außenschiene bzw. gegen die Innenschiene drückt. R_z ergibt sich bei einem zweiachsigen Fahrzeug aus

$$R_z \cdot a = 2M = \frac{s_r^2}{R} G \cdot f$$

mit

$$R_z = \frac{s_r^2}{aR} \cdot G \cdot f \quad (15)$$

Wie spätere Zahlenbeispiele zeigen, sind diese Kräfte sehr klein, der Rechnungsgang nach Gleichung (14) wurde nur der Vollständigkeit halber weitergeführt. Dagegen ist der Teil des Krümmungswiderstandes, welcher der Reibungsarbeit der Kraft R_z' längs des Weges ds entspricht, nicht ohne Bedeutung. Er folgt aus Gleichung (14) in kg/t für jede Achse

$$w_R = \frac{R_z'}{G} \cdot 1000 = \frac{s_r}{2R} \cdot f \cdot 1000 \quad (16)^{7)}$$

II. D) Seitenzugkraft.

Wenn die Fahrzeuge, die einen Zug bilden, sich nicht selbst antreiben, sondern von Lokomotiven fortbewegt werden, die sich entweder an der Spitze oder an beiden Enden des Zuges befinden, so wirken in Krümmungen seitliche Kräfte von den Fahrzeugen auf die Schienen, die kurz Seitenzugkräfte genannt werden sollen. Sie werden mit Z_z bezeichnet, wenn sie von ziehenden Lokomotiven und mit Z_D, wenn sie von drückenden Lokomotiven herrühren, während die Kraft Z die Zugkraft der Lokomotive bedeutet. Die Seitenzugkraft ist eine mit Z sich ändernde Größe, die bei der Fahrt mit einer oder mehreren Lokomotiven an der Spitze des Zuges von Achse zu Achse gegen das Ende des Zuges abnimmt.

Bei der Fahrt mit Lokomotiven an beiden Enden des Zuges nimmt die Seitenzugkraft von einem Größtwert hinter der ziehenden Lokomotive Z_z gegen die Mitte des Zuges ab, wird dort Null, ändert ihre Richtung, d. h. wird Seitendruckkraft und nimmt zu, um unmittelbar vor der Schiebelokomotive ihren Größtwert Z_D zu erreichen. Es sollen nur diese beiden äußersten Fälle untersucht werden, da sie die Größtwerte der Kräftewirkungen liefern. Da die Seitendruckkräfte gegen die Bogenaußenseite wirken, kämen eigentlich nur sie als die „gefährlichen" in Betracht, doch sollen der Vollständigkeit halber beide Wirkungen behandelt werden.[8])

II. D,1) Ziehende Lokomotiven.

Nach Abb. 12 wirkt auf die Hinterachse des Fahrzeuges eine Kraft $Z_{z,2}$ nach der Außenseite des Bogens und auf die Vorderachse eine Kraft $Z_{z,1}$ nach der Innenseite des Bogens. Aus der Abbildung folgt:

$$\left.\begin{aligned} Z_{z,2} &= Z \cdot \operatorname{tg}\mu_2 = Z\mu_2 \\ Z_{z,1} &= Z \cdot \operatorname{tg}\mu_1 = Z\mu_1 \end{aligned}\right\} \quad (17)$$

Alle in Betracht kommenden Winkel sind klein genug, daß bei allen Ableitungen sin., tang. und Bogen gleich gesetzt werden können. Die Winkel μ_1 und μ_2, welche von der Wagenkuppelung, deren Länge k ist, (gemessen von Bolzenmitte bis Zughakenmitte gleich 855 mm) mit den Wagenachsen der beiden aufeinanderfolgenden Wagen eingeschlossen werden, ergeben sich aus Abb. 13.

Zunächst ist zu unterscheiden, ob das Fahrzeug den Bogen in Spießgangstellung durchläuft oder nicht, also ob $e \lessgtr \frac{a^2}{2R}$ ist. Für $e < \frac{a^2}{2R}$ (Spießgangstellung, Abb. 12) rücken die Gelenkstellen A und B der Kupplungen aus der Gleisachse, und zwar um

---

[5]) In jüngster Zeit werden von der Firma Krupp in Essen Großgüterwagen hergestellt, die vier in dem Hauptrahmen unmittelbar eingebaute Lenkachsen haben, die seitlich verschiebbar sind und durch Längs- und Querausgleichhebel miteinander in Verbindung stehen. Es wird durch diese Anordnung zwar an Baustoff für den Wagen gespart, auch die Lenkkraft wird durch die Verschiebbarkeit der Achsen auf zwei Anlaufstellen verteilt, dagegen ist nicht zu vermeiden, daß die Anlaufwinkel der Räder viel größer sein werden als bei Anordnung von Drehgestellen, was für Rad- und Gleisabnützung, wie später gezeigt werden wird, von großem Nachteil ist. Inwieweit sich diese Laufwerkanordnung bewährt und Drehgestelle ersetzen kann, müßte erst längere Beobachtung von Rädern und Gleis zeigen.

[6]) Haben die Räder statt walzenförmige Reifen solche von Kegelform, dann sind die beiden Drehmomente nicht gleich, wohl aber zumeist ihre Summe gleich $2M$; da bei Spießgangstellung der Fahrzeuge bei der führenden Achse der Wegunterschied zwischen innerem und äußerem Rad geringer, bei der zweiten Achse aber größer ist als $s_r \cdot d\varphi$ kann die Kegelform der Räder auf das Endergebnis aus den Betrachtungen II. C) keinen wesentlichen Einfluß haben.

[7]) Die getrennte Behandlung von w_L und w_R ist streng genommen nicht richtig, da der Reibwert f nur für die resultierende Bewegung (Gleiten in der Richtung der Kräfte L und R_z) gilt. Die Gleichungen (4) und (16) geben also zusammen etwas zu große Werte für diese Teile des Krümmungswiderstandes, sind hingegen sehr übersichtlich, und der Mangel an Genauigkeit fällt nicht ins Gewicht, weil die Wahl des Reibwertes f, worauf später noch hingewiesen werden wird, in weit größeren Grenzen unsicher ist.

[8]) Bei Boedecker finden sich Betrachtungen über diese Einflüsse in [2a] S. 43 und [2e] S. 59, jedoch lediglich hinsichtlich der Seitenzugkraft. (Siehe Fußnote 3).

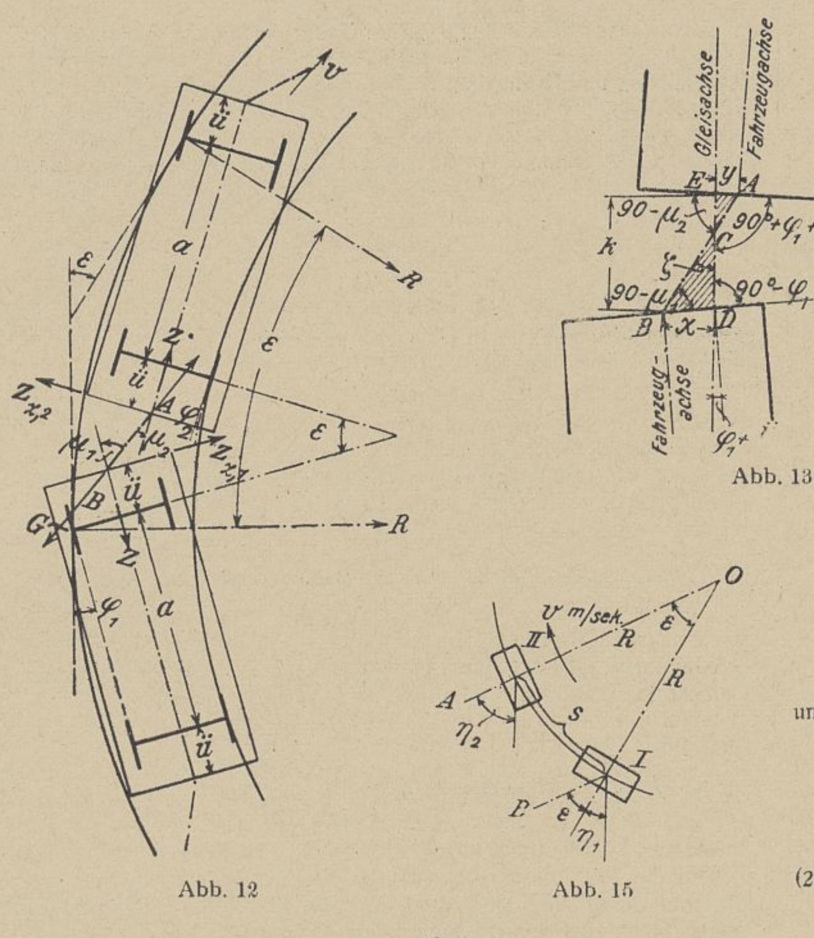


Abb. 12 Abb. 13 Abb. 15

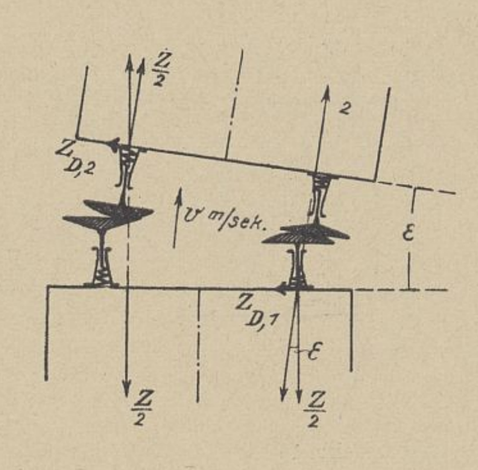


Abb. 14

$$\left.\begin{aligned} x &= \frac{e}{2} + \varphi_1 \cdot \ddot{u} + \frac{\ddot{u}^2}{2R} \\ y &= \frac{e}{2} - \varphi_2\, \ddot{u} - \frac{\ddot{u}^2}{2R} \end{aligned}\right\} \quad (18)$$

Dabei gelten für φ_1 und φ_2 die Werte aus Gleichung (6) und (7), und $\ddot{u}$ bedeutet den Ueberstand des Wagenrahmens über die Achsen. Der Winkel, den die Kuppelungen mit der Gleisachse einschließen, ist

$$\xi = \frac{x+y}{k}.$$

Aus den Gleichungen (18), (6) und (7) folgt:

$$\xi = \frac{e + \ddot{u}(\varphi_1 - \varphi_2)(\varphi_1 + \varphi_2)}{k} = \frac{e + \ddot{u}\,\frac{2e}{a}}{k} = \frac{e}{k} \cdot \left(1 + \frac{2\ddot{u}}{a}\right) \quad (19)$$

Während y nach Gleichung (18) auch negative Werte annehmen kann, also umgekehrt liegt als in Abb. 13 gezeichnet, muß ξ nach Gleichung (19) immer die in Abb. 13 gezeichnete Lage haben, da der Ausdruck nur positiv sein kann.

Aus dem Anlaufwinkel φ_1 bei G (Abb. 12) ergibt sich der Winkel, den die Fahrzeugachse mit der Gleisachse bei D (Abb. 13) einschließt mit $\varphi_1 + \frac{\ddot{u}}{R}$. Daraus folgen die Winkel des Dreiecks DFE

1. $90^0 - \varphi_1 - \frac{\ddot{u}}{R}$,

2. $\varepsilon = \frac{l}{R}$,

wenn l die Gesamtlänge des Fahrzeuges bedeutet, und

3. $90^0 + \varphi_1 + \frac{\ddot{u}}{R} - \varepsilon$;

und in weiterer Folge:

$$\mu_1 = \varphi_1 + \frac{\ddot{u}}{R} + \xi$$

$$\mu_2 = \varphi_1 + \frac{\ddot{u}}{R} + \xi - \varepsilon \quad \text{oder}$$

$$\left.\begin{aligned} \mu_1 &= \frac{a}{2R} + \frac{e}{a} + \frac{\ddot{u}}{R} + \frac{e}{k}\left(1 + \frac{2\ddot{u}}{a}\right) \\ \mu_2 &= \frac{a}{2R} + \frac{e}{a} + \frac{\ddot{u}}{R} + \frac{e}{k}\left(1 + \frac{2\ddot{u}}{a}\right) - \frac{l}{R} \end{aligned}\right\} \quad (20)$$

Daraus ist ersichtlich, daß μ_1 nur positive Werte annehmen kann, daher $Z^z{}_{z_1}$ immer nach der Bogeninnenseite wirkt, während μ_2 auch negative Werte annehmen kann, d. h. $Z^z{}_{z_2}$ kann bei sehr kleinen Halbmessern und geringem Spielraum auch negativ werden, also nach innen wirken.

Ist $e > \frac{a^2}{2R}$, d. h. läuft das Fahrzeug mit freier Hinterachse, dann ist $\varphi_1 = \frac{a}{R}$, mithin mit Beziehung auf Abb. 4

$$\left.\begin{aligned} x &= \frac{e}{2} + \frac{a\ddot{u}}{R} + \frac{\ddot{u}^2}{2R} \\ y &= \frac{a^2}{2R} - \frac{e}{2} - \frac{\ddot{u}^2}{2R} \end{aligned}\right\} \quad (21)$$

Daraus folgt:

$$\xi = \frac{1}{k} \cdot \left(\frac{a^2}{2R} + \frac{a\ddot{u}}{R}\right) = \frac{a}{kR}\left(\frac{a}{2} + \ddot{u}\right) \quad (22)$$

und mithin

$$\left.\begin{aligned} \mu_1 &= \frac{a}{R} + \frac{\ddot{u}}{R} + \frac{a}{kR}\left(\frac{a}{2} + \ddot{u}\right) \ldots . \\ \mu_2 &= \frac{a}{R} + \frac{\ddot{u}}{R} + \frac{a}{kR}\left(\frac{a}{2} + \ddot{u}\right) - \frac{l}{R} \end{aligned}\right\} \quad (23)$$

Die Gleichungen (18), (19), (20) gehen in die Gleichungen (21), (22), (23) über, wenn $e = a^2 : 2R$ gesetzt wird.

II. D,2) Drückende Lokomotive.

Befindet sich die arbeitende Lokomotive am Ende des Zuges, so wird ihre Zugkraft durch die Puffer übertragen, wie Abb. 14 zeigt. Wird angenommen, daß die Druckkräfte immer senkrecht zur gewölbten Pufferoberfläche übertragen werden, weiter, daß jeder Puffer die halbe Zugkraft $Z : 2$ überträgt, so wirkt an jedem Wagenende eine Seitenzugkraft Z_D gegen die Bogenaußenseite

$$Z_{D,1} = Z_{D,2} = \frac{Z}{2} \operatorname{tang} \varepsilon = \frac{Zl}{2R} \quad (24),$$

die von der Stellung des Fahrzeuges im Gleis unabhängig ist.

Wie aus der Abb. zu ersehen ist, werden die inneren Puffer mehr zusammengedrückt als die äußeren; dem entsprechend müssen sie auch eine größere Zugkraft übertragen, so daß $Z_{D,1} > Z_{D,2}$ sein wird. Da $Z_{D,1}$, am Vorderrade nach außen wirkend, als für die Entgleisung gefährlicher anzusehen ist, wäre also bei der gebräuchlichen Anordnung der Puffer (linker Puffer vom Wagen aus gesehen eben, rechter Puffer gekrümmt) die Gefahr des Entgleisens in Rechtsbogen größer als in Linksbogen. Es wäre wissenswert, ob sich aus einer Unfallstatistik nachweisen ließe, daß die Pufferanordnung, bzw. der Unterschied der zwischen den Puffern übertragenen Kräfte von tatsächlichem Einfluß ist.

II. E) Drehkräfte.

Die bis jetzt besprochenen Kräfte treten bei der Fahrt in unveränderlicher Krümmung vom Halbmesser R auf. Beim Befahren von veränderlichen Krümmungen (Uebergangsbogen) sind außer diesen Kräften noch Beschleunigungs- und Verzögerungsdrehkräfte von Rad auf Schiene und umgekehrt zu übertragen. Das Fahrzeug führt in Krümmungen bzw. in Uebergängen der Krümmung zwei Drehungen aus:

1. um die lotrechte Achse z,
2. um die wagerechte Längsachse x.

Letztere Drehung kommt infolge der Ueberhöhung der Außenschiene zustande, und zwar dreht sich das Fahrzeug, wenn es die Anrampung befährt, um eine im allgemeinen gleichlaufend zur x-Achse liegenden Geraden. Die Ueberhöhung der Außenschiene lag vollständig außerhalb des Kreises der bisherigen Betrachtungen und wird im nächsten Abschnitt II. F) behandelt werden.

II. E,1) Drehung um die z-Achse.

Bei der Fahrt in unveränderlicher Krümmung dreht sich das Fahrzeug um die lotrechte Achse mit unveränderlicher Winkelgeschwindigkeit ω_z. Auf dem Weg s von I nach II (Abb. 15) hat sich das Fahrzeug um den Winkel $\eta_2 - \eta_1$ gedreht. Diesem Drehungswinkel entspricht nach Abb. 15 der Winkel ε, da IB gleichlaufend mit AO und daher $\eta_1 + \varepsilon = \eta_2$ ist. Bewegt sich das Fahrzeug mit der Geschwindigkeit v m/sek, so ist $s = v \cdot t$ und $v \cdot t = R \cdot \varepsilon$, mithin $\varepsilon = \frac{v \cdot t}{R}$. Daraus folgt der Drehungswinkel in der Zeiteinheit, die

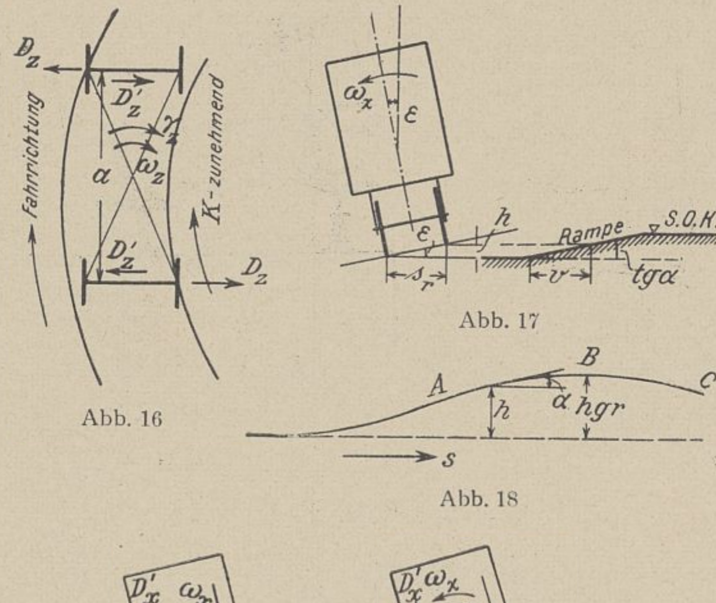


Abb. 16

Abb. 17

Abb. 18

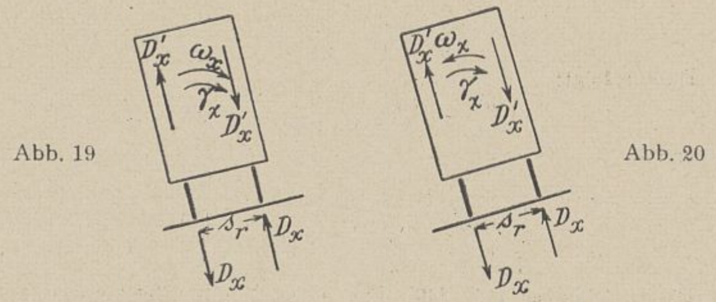


Abb. 19

Abb. 20

Winkelgeschwindigkeit $\omega_z = \frac{v}{R} = v \cdot K$, wenn mit K der gegengleiche Wert des Krümmungshalbmessers bezeichnet werden soll.

Aendert sich die Krümmung, dann ändert sich auch die Winkelgeschwindigkeit und setzt das Auftreten einer Winkelbeschleunigung γ_z voraus: $\gamma_z = \frac{d\,\omega_z}{d\,t} = v\,\frac{d\,K}{d\,t}$, wenn die Geschwindigkeit der Fahrt v unverändert bleibt. Da $\frac{d\,K}{d\,t}$, die Aenderung der Krümmung nach der Zeit von der Fahrgeschwindigkeit abhängt, weil aus $ds = v \cdot dt$, $\frac{d\,K}{d\,t} = v\,\frac{d\,K}{d\,s}$ ist, ergibt sich die Winkelbeschleunigung, die auf das Fahrzeug ausgeübt werden muß, wenn eine veränderliche Krümmung, deren Verlauf durch Festlegung der Krümmungszunahme längs des zurückgelegten Weges $\frac{dK}{d\,s}$ gegeben ist, mit der Geschwindigkeit v befahren wird, mit

$$\gamma_z = v^2\,\frac{dK}{ds} \qquad (25)$$

Zur Erzielung dieser Winkelbeschleunigung muß auf das Fahrzeug ein Drehmoment M_z wirken:

$$M_z = I_z \cdot \gamma_z,$$

wenn I_z das Massenträgheitsmoment des Wagens bezogen auf die Drehachse bedeutet. Dieses Drehmoment ist durch ein Kräftepaar D_z' zu leisten (Abb. 16). Es wirkt in der Richtung der Winkelgeschwindigkeit also beschleunigend bei zunehmender Krümmung und entgegengesetzt zur Winkelgeschwindigkeit bei in der Fahrrichtung abnehmender Krümmung. Die Kräfte D_z sind die den Kräften D_z' entgegengesetzt gerichteten Gegenwirkungen, mit welchen die Räder auf die Schienen wirken, und zwar drückt bei zunehmender Krümmung (Abb. 16) die Vorderachse nach außen und die Hinterachse nach innen. Die Größe von D_z ergibt sich mit Benützung der Gleichung (25) aus

$$D_z \cdot a = M_z = I_z \cdot v^2\,\frac{dK}{ds} \text{ mit}$$

$$D_z = \frac{I_z \cdot v^2}{a} \cdot \frac{dK}{ds} \qquad (26)$$

II. E,2) Drehung um die x-Achse.

Die Beschleunigungs- und Verzögerungsdrehkräfte D_x, die beim Befahren von Ueberhöhungsrampen auftreten, ändern zwar in erster Linie nur die Druckverteilung auf beide Schienen und haben keine wagerechte Wirkung, doch sollen auch diese hergeleitet werden, da sie in anderer Hinsicht bei großen Geschwindigkeiten von Bedeutung sein können.

Wenn ein Fahrzeug die Ueberhöhungsrampe des Ueberganges befährt, dreht es sich um eine Längsachse (bei der jetzt gebräuchlichen Anordnung der Ueberhöhung „ganze Ueberhöhung der Außenschiene" dreht es sich um die Innenschiene), und zwar bei zunehmender Ueberhöhung und Krümmung in der Pfeilrichtung (Abb. 17). Bei gradliniger Anrampung ($\tan\alpha$ = Festwert) ist auch die Winkelgeschwindigkeit ω_x unveränderlich, die Drehbewegung eine gleichförmige, äußere Kräftewirkungen finden nicht statt. Die Winkelgeschwindigkeit ergibt sich als Zunahme des Drehwinkels ε in der Zeiteinheit mit

$$\omega_x = \varepsilon = \frac{h}{s_r} = \frac{v \cdot \mathrm{tg}\,\alpha}{s_r};$$

Ist die Anrampung nicht gradlinig wie an den Ausrundungsstellen (Abb. 18) oder wie bei stetigem Verlauf der Krümmung und Ueberhöhung[8a], dann ändert sich $\mathrm{tg}\,\alpha$ und damit die Winkelgeschwindigkeit, und man erhält ihre Aenderung nach der Zeit, die Winkelbeschleunigung γ_x mit

$$\gamma_x = \frac{d\omega_x}{dt} = \frac{v}{s_r} \cdot \frac{d\,\mathrm{tg}\,\alpha}{dt}$$

Aus $ds = v \cdot dt$ ergibt sich nämlich wie im Abschnitt II. E,1)

$$\gamma_x = \frac{v^2}{s_r} \cdot \frac{d\,\mathrm{tg}\,\alpha}{ds} \qquad (27)$$

Da die Ueberhöhung h verhältnisgleich der Krümmung K ist:

$$h = \frac{s_r\,v^2}{g} \cdot K,$$

die bekannte Gleichung für die Ueberhöhung aus der Fliehkraft gefolgert, erkennt man aus Abb. 18, daß

$$\frac{dh}{ds} = \mathrm{tg}\,\alpha = \frac{s_r\,v^2}{g} \cdot \frac{dK}{ds}$$

ist und mithin aus Gleichung (27)

$$\gamma_x = \frac{v^4}{g} \cdot \frac{d^2K}{ds^2} \qquad (28)$$

Positive Werte von γ_x bedeuten Beschleunigung, die Richtung von ω_x und γ_x fallen zusammen, negative Werte Verzögerung. Beim Befahren der Ueberhöhungsrampe von A über B nach C (Abb. Nr. 18) ist im ersten Teil bis zur Stelle, wo h gleich h_{gr} wird, $\mathrm{tg}\,\alpha$ abnehmend, $\frac{d\,\mathrm{tg}\,\alpha}{ds}$ daher negativ, γ_x eine Verzögerung und wirkt entgegengesetzt zu ω_x (Abb. 19). Zur Erzeugung dieser Drehbeschleunigung γ_x muß auf das Fahrzeug ein Kräftepaar wirken D_x', das von den Schienen auf das Fahrzeug zu übertragen ist, so daß diese als Gegenwirkung mit den Kräften D_x mehr bzw. weniger belastet werden, wie Abb. 19 zeigt.

Nach Ueberschreiten von h_{gr}, wo $\omega_x = 0$ geworden ist, ändert sich die Drehrichtung (Abb. 20), $\mathrm{tg}\,\alpha$ nimmt zu, γ_x wird positiv, und

[8a]) Siehe „Gestaltung des Gleises für große Fahrgeschwindigkeit". Organ 1922, S. 297 (vom Verfasser).

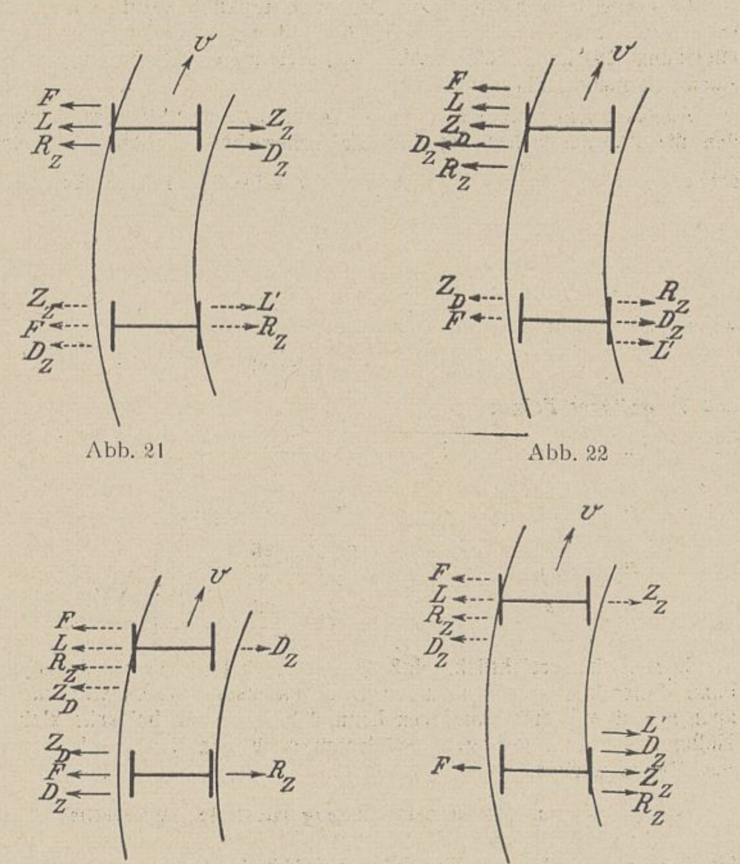


Abb. 21

Abb. 22

Abb. 23

Abb. 24

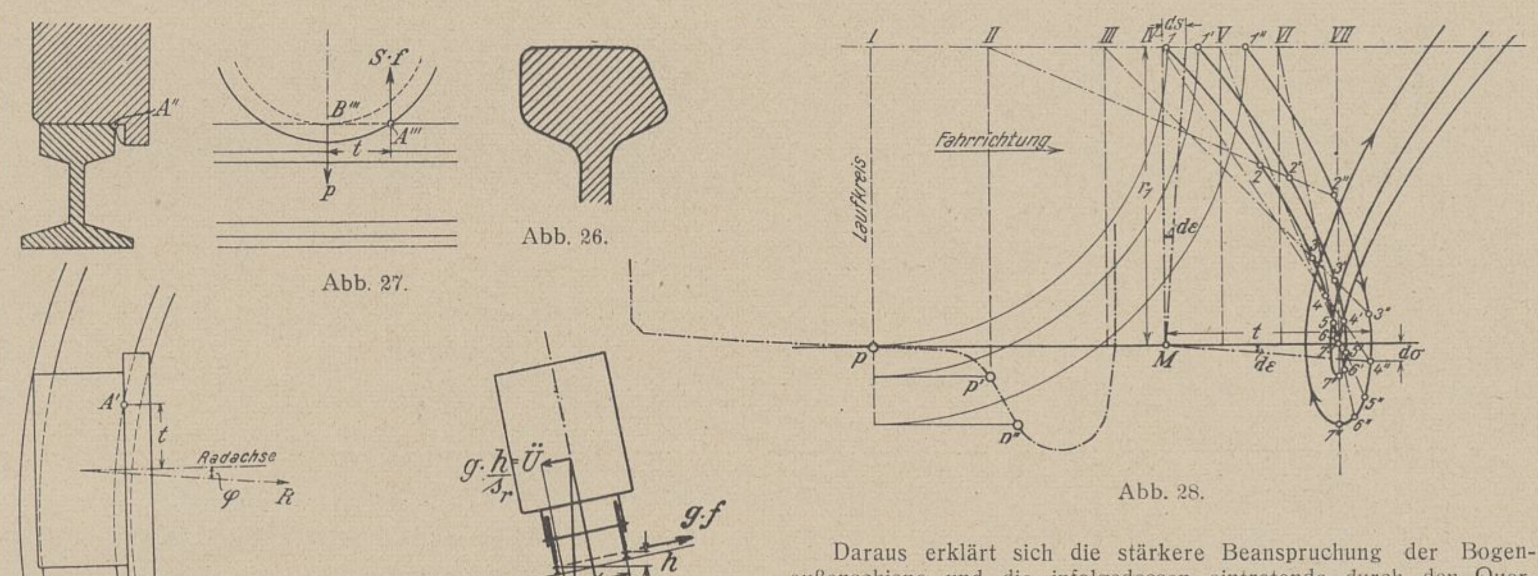


Abb. 27.

Abb. 26.

Abb. 25.

Abb. 28.

ω_x und γ_x sind gleichgerichtet. Da γ_x dieselbe Richtung hat wie in Abb. 19 bleiben auch die Kräftewirkungen die gleichen, d. h. während der ganzen Fahrt von A über B nach C wird die Außenschiene entlastet, die Innenschiene überlastet.

Die Größe der Ueber- und Entlastungen ergibt sich aus der Gleichung

$$M_x = I_x \cdot \gamma_x,$$

wenn I_x das Massenträgheitsmoment bezogen auf die Längsdrehachse bedeutet, bei zweiachsigen Fahrzeugen

$$2 \cdot (D_x \cdot s_r) = I_x \frac{v^4}{g} \cdot \frac{d^2K}{ds^2}$$

$$D_x = I_x \cdot \frac{v^4}{2 s_r \cdot g} \cdot \frac{d^2K}{ds^2} \qquad (29)$$

Man ersieht daraus, daß bei großen Fahrgeschwindigkeiten diese Entlastungen wegen Entgleisungsgefahr von Bedeutung sein können, da v in der vierten Potenz erscheint und es notwendig ist durch entsprechende Einflußnahme auf den Verlauf der Krümmung, Herabsetzung von $\frac{d^2K}{ds^2}$, diese Entlastung in zulässigen Grenzen zu halten.

II. F) Ueberhöhung der Außenschiene.

Die in den Abschnitten II. A) bis II. E) behandelten Kräfte überlagern sich entweder in ihrer Wirkung oder sie heben sich teilweise auf. Die Kräfte F und L und das Kräftepaar R_2 haben immer den gleichen Richtungssinn, während die andern bald in dem einen, bald in dem andern Sinne wirken können. Die Abb. 21 bis 24 sollen die Ueberlagerungen der Kräfte veranschaulichen, und zwar die beiden äußersten Fälle, für die Vorderachse in Abb. 21 und 22, für die Hinterachse in Abb. 23 und 24. Schon aus diesen Abbildungen erkennt man, wie später zahlenmäßig nachgewiesen werden wird, daß die Kräfte nach der Außenseite des Bogens, insbesondere hinsichtlich der Vorderachse, bei weitem überwiegen. Ein Mittel, diesen Kräften wirksam zu begegnen, besteht in der Ueberhöhlung der Außenschiene gegenüber der Innenschiene. Dadurch entsteht eine vom Wagengewicht herrührende, nach innen gerichtete Seitenkraft, die für jede Achse $\ddot{U} = G \frac{h}{s_r}$ beträgt. (Abb. 25) und den Seitendruck zwischen Rad und Schiene vermindert. Daß es jedoch unmöglich ist, durch die Ueberhöhung der Außenschiene die Kräftewirkungen vollkommen aufzuheben, läßt sich schon aus den Abb. 21 bis 24 erkennen, da Vorder- und Hinterachse unter ungleichen Kräfteeinflüssen stehen. Insbesondere erkennt man, daß die Vorderachsen immer an der Außenschiene laufen müssen, da schon die Lenkkraft allein eine seitliche Reibung von der Größe $G \cdot f$ in der gezeichneten Richtung (Abb. 25) auslöst, die von $\ddot{U}$ überwunden werden müßte, ehe sich die Vorderachse von der Außenschiene entfernt. Da bei den größten Ueberhöhungen, die angewendet werden können, immer

$$G \cdot f > G \frac{h}{s_r} = \ddot{U}$$

ist, laufen sämtliche Vorderachsen der Fahrzeuge in der Regel (abgesehen von der Schlingerbewegung) an der Außenschiene, während die Hinterachse je nach Achsstand und Kräftewirkungen verschiedene Stellungen im Gleis einnehmen kann.

Daraus erklärt sich die stärkere Beanspruchung der Bogenaußenschiene und die infolgedessen eintretende durch den Querschnitt des Radreifens bedingte seitliche Abnützung (Abb. 26), die für die folgenden Betrachtungen grundlegend sein soll.

III. Der Widerstand der Schiene.

Es ist im Eisenbahnwesen sehr bald üblich geworden, die seitlichen Kräfte durch innen liegende Spurkränze von Rad auf Schiene zu übertragen. Durch Spurkränze, weil Räder, die durch Spurleisten der Schienen geführt werden (nur in den allerersten Anfängen des Eisenbahnwesens finden sich solche) zu große führungslose Strecken bei den Gleisverbindungen zur Folge haben und innenliegende, weil dadurch bei der bis jetzt üblichen Kegelform der Radreifen das Abrollen größerer Kreise an der Außenseite der Bogen und kleinerer Kreise an der Innenseite ermöglicht wird. Bei walzenförmigen Radlaufflächen, für die unter gewissen Umständen später eingetreten werden wird, hätten außenliegende Spurkränze dieselbe Berechtigung, doch sollen den folgenden Untersuchungen nach altem Brauche innenliegende Spurkränze zugrunde gelegt werden.

Am sichersten wird der seitliche Druck des Rades aufgenommen, wenn Schiene und Spurkranz lotrechte Begrenzungsflächen haben (Abb. 27). Der Seitendruck S wird im Berührungspunkt A des Spurkranzes übertragen und müßte befähigt sein, dort eine Reibungskraft von der Größe $S \cdot f > P$ zu erzeugen, wenn das Rad nicht um den Punkt B, sondern um den Punkt A zu kippen beginnen soll. Die Bedingung, daß Kippen um A „Aufsteigen des Rades" eintritt, ist also, daß die Seitenkraft S und der Raddruck P in folgender Beziehung stehen:

$$S \geqq \frac{P}{f} \qquad (30)$$

Da so große Seitenkräfte noch nie beobachtet worden sind, besteht, wie die späteren Zahlenbeispiele zeigen, vielfache Sicherheit gegen Aufsteigen des Rades.

Lotrechte Flanschflächen des Spurkranzes verursachen aber einen großen Krümmungswiderstand. Der dritte Anteil des Krümmungswiderstandes[9]) infolge des Seitendruckes S kommt dadurch zustande, daß der an die Schiene gedrückte Spurkranz gegenüber der Schiene eine Relativbewegung ausführt, wobei Reibungsarbeit zu leisten ist, die bei gegebener Seitenkraft S, deren Zusammensetzung im Abschnitt II besprochen wurde, um so größer ist, je größer der Weg ist. Und dieser Weg wächst in dem Maße, als der Berührungspunkt A vom Stützpunkt B entfernt ist.

Denn alle Punkte des Spurkranzes beschreiben verlängerte Zykloiden (Abb. 28), wo man ersehen kann, daß die Relativgeschwindigkeit eines Punktes gegenüber der Schiene um so kleiner wird, je näher er dem Stützpunkt liegt, wo sie gleich Null ist. In Abb. 28 sind die Bahnen dreier Punkte gezeichnet, und zwar eines Punktes der Lauffläche (1, 2, 3, usw.), des äußersten Punktes des Spurkranzes, der noch anlaufen kann (1", 2", 3", usw.) und eines dazwischenliegenden Punktes am Flansche des Spurkranzes (1', 2', 3', usw.). Dabei entsprechen die Punktbahnen unterhalb der Schienenoberkante beinahe vollkommen der Natur mit einer geringen Breitenverzerrung.

Durch die Neigung des Flansches des Spurkranzes gegen die Lotrechte wird der Anlaufpunkt A gegen B verschoben, wodurch Punkte mit der Schiene in Berührung kommen, die eine kleinere Relativgeschwindigkeit dieser gegenüber haben, was den Krümmungswiderstand verkleinert. Und zwar ist diese Verschiebung des Anlaufpunktes gegen B um so größer, je kleiner der Neigungswinkel α des Flansches des Spurkranzes gegen die Wagrechte ist. Mit Abb.

[9]) Siehe Abschnitt II. B) und II. C) (bezüglich der ersten beiden Anteile).

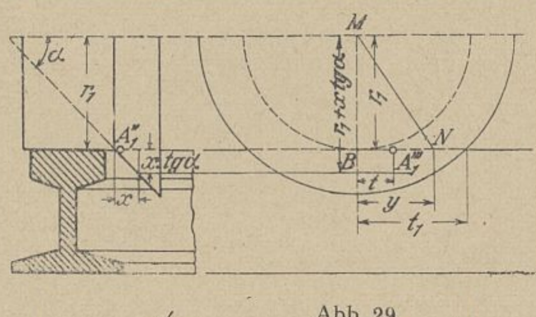
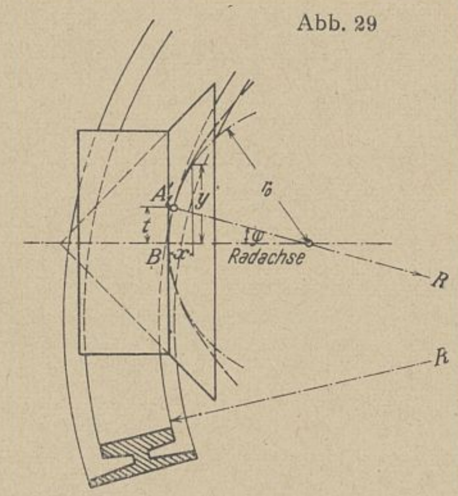


Abb. 29



Nr. 29 soll dies gezeigt werden. Der im Grundriß gezeichnete Kreis vom Halbmesser r_0 stellt den Scheitelkreis des Hyperbelschnittes dar, der entsteht, wenn die kegelförmig gedachte Flanschfläche des Spurkranzes von der wagrecht und eben gedachten Fahrfläche des Schienenkopfes geschnitten wird. Die Gleichung des Hyperbelschnittes ist aus Abb. Nr. 29 ($MN = r_1 + x \cdot \mathrm{tg}\alpha$)

$$y^2 = 2\,r_1\,x\,\mathrm{tg}\,\alpha + x^2\,\mathrm{tg}^2\,\alpha,$$

wenn r_1 den Radhalbmesser bedeutet[10]). Ein Kreis, der durch den Scheitel und einen Hyperbelpunkt (x, y) geht, hat den Halbmesser

$$r = \frac{y^2}{2x} = r_1 \cdot \mathrm{tg}\,\alpha + \frac{x \cdot \mathrm{tg}^2\,\alpha}{2};$$

der Scheitelkreis hat mithin den Halbmesser

$$r_0 = \lim_{x=0} r = r_1 \cdot \mathrm{tg}\,\alpha$$

r_0 wird demnach in dem Maße kleiner, als der Neigungswinkel des Flansches des Spurkranzes α gegen die Wagerechte abnimmt. Der Anlaufpunkt A_1 liegt im Berührungspunkt der beiden Kreise r_0 und R, dem Gleishalbmesser, und sein Abstand von B ist

$$t = r_0 \cdot \sin\varphi = r_1 \cdot \mathrm{tg}\,\alpha \cdot \sin\varphi \quad (31)$$

wobei φ den Anlaufwinkel des Rades bedeutet. Die Größe des Winkels φ hängt vom Achsstand, dem Halbmesser des Gleises und dem Spielraum des Fahrzeuges im Gleis ab und wurde bereits im Abschnitt II. B) behandelt. Mit jenen dort gefundenen Werten und mit Hilfe der Abb. 28 läßt sich nun der dritte Anteil des Krümmungswiderstandes w_s bestimmen, der von der Spurkranzreibung der anlaufenden Räder herrührt, die mit der Seitenkraft S an die Schiene gepreßt werden. Nach Abb. 28 ist die Reibungsarbeit bei der fortschreitenden Bewegung des Fahrzeuges auf dem Weg ds

$$d\,A_s = f \cdot S \cdot d\sigma$$

wenn $d\sigma : t = ds : r_1$ ist, da sich das Rad während der Differenzialbewegung um den augenblicklichen Drehpunkt M (Drehungswinkel $d\varepsilon$) dreht. Daraus folgt:

$$d\,A_s = f \cdot S\,\frac{t}{r_1} \cdot ds.$$

Die Zugkraft der Lokomotive hat mithin auf dem Weg ds mit der Kraft

$$\frac{d\,A_s}{ds} = \frac{f \cdot S \cdot t}{r_1}$$

zu wirken, um die Reibungsarbeit zu leisten. Der Anteil des Krümmungswiderstandes für ein zweiachsiges Fahrzeug, wenn nur eine Achse anläuft, ist in kg/t

$$w_s = \frac{f \cdot S \cdot t}{2\,G \cdot r_1} \cdot 1000$$

oder mit Gleichung (31) wird

$$w_s = \frac{f \cdot S \cdot \mathrm{tg} \cdot \alpha \cdot \sin\varphi_1}{2\,G} \cdot 1000 \quad (32)$$

Bewegt sich das Fahrzeug nach Abb. 5 durch den Bogen, so trägt auch die anlaufende Hinterachse zum Krümmungswiderstand bei mit

$$w_s' = \frac{f \cdot S_2 \cdot \mathrm{tg}\,\alpha \cdot \sin\varphi_2}{2\,G} \cdot 1000 \quad (33)$$

[10]) Siehe Boedecker „Rad und Schiene" S. 36.



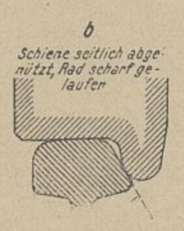




Abb. 30

Diese Gleichungen gelten unter der Voraussetzung, daß

$$\mathrm{tg}\,\alpha\,\sin\varphi \leq \frac{t_1}{r_1}$$

(Gleichung 31), da t nie größer werden kann als t_1 (Abb 29). Aus $t_1 = 2 r_1 h_0$ folgt

$$\mathrm{tg}\,\alpha \cdot \sin\varphi \leq \sqrt{\frac{2h_0}{r_1}},$$

wenn mit h_0 die Spurkranzhöhe bezeichnet wird. Mit Ueberschreiten des Grenzwertes $\sqrt{\frac{2\,h_0}{r_1}}$ steigt der Krümmungswiderstand w_s nicht mehr weiter an, wenn auch die Winkel α und φ größer werden, als der obigen Grenzbedingung entspricht. Dieser Fall tritt bei den regelspurigen Bahnen und den üblichen Achsständen erst bei ganz scharf gelaufenen Rädern ($\alpha \doteq 85^0$) ein.

Aus dem Einfluß, den der Anlaufwinkel φ_1 und φ_2 auf den Krümmungswiderstand hat, erkennt man, daß auch aus diesen Ueberlegungen heraus ein Bogen dann am besten befahren wird, wenn die Abmessungen des Fahrzeuges zum Gleis sich nach Abb. 3 verhalten, d. h. $e = \frac{a^2}{2R}$ ist. Sowohl kleinere als auch größere Spurweiten wirken ungünstig.

Setzt man vorübergehend zur besseren Uebersichtlichkeit in Gleichung (32) S lediglich gleich dem Hauptbestandteil (Lenkkraft $L = G \cdot f$) und $\varphi = \frac{a}{R}$ (8), so erhält man:

$$w_S = \frac{f^2 \cdot \mathrm{tg}\,\alpha \cdot a}{2\,R} \cdot 1000 \quad (34)$$

woraus ersichtlich ist, daß w_S verhältnisgleich dem Quadrat des Reibwertes ist, mit $\mathrm{tg}\alpha$, a und umgekehrt mit R wächst. Insbesondere wächst w_S sehr rasch mit Größerwerden des Winkels α, weil dort die tg sehr rasch zunimmt.

Aus den Gleichungen (4), (16) und (34) kann nun eine übersichtliche Form des gesamten Krümmungswiderstandes k zusammengestellt werden:

$$k = w_L + w_R + w_S = \frac{f \cdot a}{2R} \cdot 1000 + \frac{s_r}{2R} \cdot f \cdot 1000 + \frac{f^2 \cdot \mathrm{tg}\,\alpha \cdot a}{2R}\,1000$$

$$k = \frac{a \cdot f}{2R}\,1000\left(1 + \frac{s_r}{a} + f \cdot \mathrm{tg}\alpha\right) \quad (35)$$

Die in Wirklichkeit bestehenden Ausrundungen zwischen Schienenkopf und Radreifen, die bei diesen Ueberlegungen unberücksichtigt bleiben mußten, machen diese einfachen Beziehungen zwar verwickelter, ohne aber die Tatsache ändern zu können, daß der Berührungspunkt bzw. die Berührungszone bei flacher werden des Flansches des Spurkranzes gegen B rückt und dadurch den Krümmungswiderstand verkleinert.

Nach dieser Erkenntnis wird man also trachten, den Neigungswinkel „α" so weit zu verkleinern, bis die notwendige Sicherheit gegen Aufsteigen des Rades dieser Verflachung eine Grenze setzt.

Zur Umschreibung einer solchen Grenze wird in folgendem das Kräftespiel zwischen Rad und Schiene verfolgt werden. Gleich jetzt sei darauf hingewiesen, daß die Kräftewirkungen, die in folgendem betrachtet werden, keine Aenderung erfahren, wie immer auch das Zusammenwirken zwischen Rad und Schiene sei (Abb. 30a, b oder c), da es lediglich auf die Flächenneigung im Berührungspunkt ankommt, die in allen Fällen gleich „α" ist.

Abb. 31 zeigt den Querschnitt von Rad und Schiene im Berührungspunkte A_1 der Abb. 29. An dieser Stelle führt der Punkt des Spurkranzes noch eine der Zykloide entsprechende Abwärtsbewegung aus, wenn die Reibungskraft, die sich dieser Abwärtsbewegung widersetzt, von den nach abwärts gerichteten Kräften überwunden werden kann. Im entgegengesetzten Falle tritt „Aufsteigen" ein, wenn $S'' \cdot f > Q'$ ist.

Die Seitenkraft S zerlegt sich in zwei Teilkräfte nach Richtungen, in welchen Gegenkräfte auftreten können, also nach S', dem die Radlast entgegenwirkt und nach S'', dem Widerstand der Schiene.

$S'' = S : \sin\alpha$ erzeugt eine Reibung von der Größe $S'' \cdot f$, und $S' = S \cot g\alpha$ vermindert das nach abwärts wirkende Gewicht. Die Kraft, welche die Reibung längs der schiefen Ebene von der Neigung „α" zu überwinden hat, ist mithin

$$Q' = (P - S')\sin\alpha = (P - S \cdot \mathrm{cotg}\alpha) \cdot \sin\alpha.$$

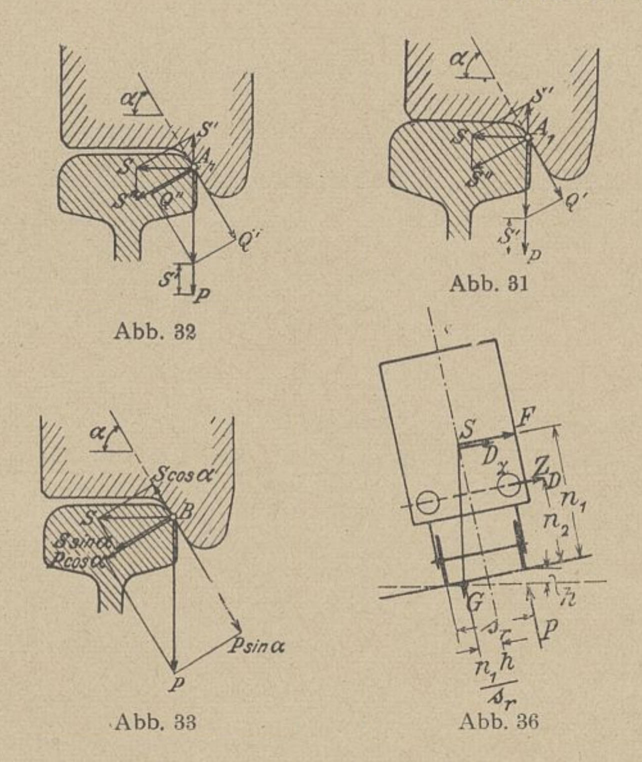


Abb. 32 Abb. 31 Abb. 33 Abb. 36

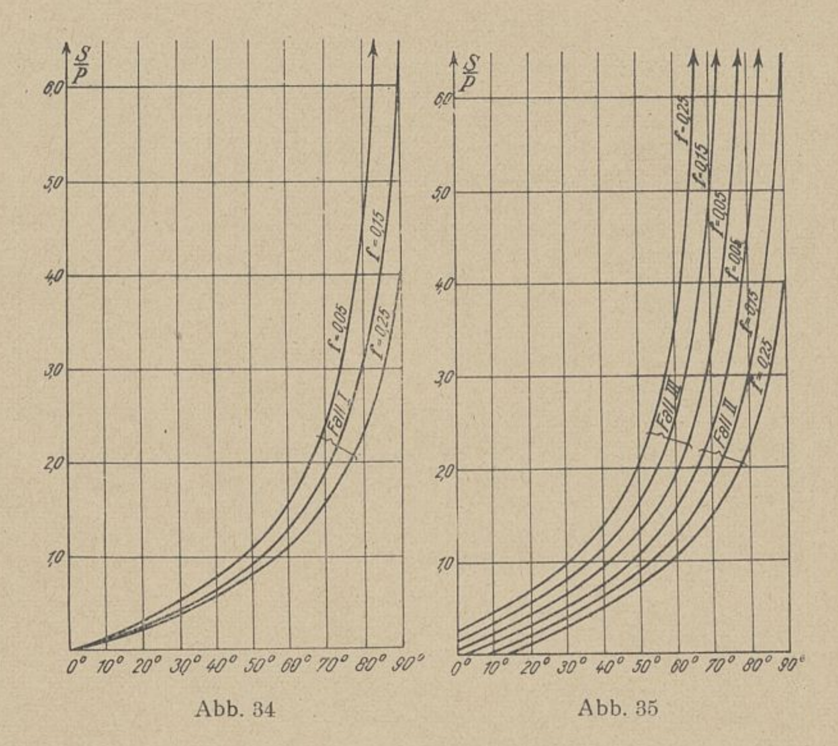


Abb. 34 Abb. 35

Die Bedingungsgleichung für den Grenzwinkel des Aufsteigens ist daher:

$$\frac{S}{\sin\alpha} \cdot f = (P - S \cdot \operatorname{cotg}\alpha) \cdot \sin\alpha \quad (36)$$

Diese Gleichung gilt für den Fall, als die Gegenkraft der nach abwärts wirkenden Kräfte $(P - S')$ noch von der Fahrfläche des Schienenkopfes geleistet wird, also während des gewöhnlichen Laufes der Räder. Ist hingegen Aufsteigen des Rades bereits eingeleitet worden und hat sich der Radreifen von der Fahrfläche des Schienenkopfes abgehoben, dann wird auch von der Seitenkraft Q'' (Abb. 32) Reibung zwischen Spurkranz und Schiene erzeugt, die von Q' zu überwinden wäre, wenn wieder Abwärtsbewegung des Rades eintreten soll.

Da diese Reibungskraft

$$Q'' \cdot f = (P - S \cdot \operatorname{cotg}\alpha) \cdot f \cdot \cos\alpha.$$

lautet die Bedingungsgleichung

$$\frac{S}{\sin\alpha} \cdot f + (P - S \cdot \operatorname{cotg}\alpha) \cdot f \cdot \cos\alpha = (P - S \cdot \cot\alpha) \cdot \sin\alpha \quad (37)$$

Beide Gleichungen (36) und (37) gehen für $\alpha = 90^0$ in Gleichung (30) über, den bereits behandelten Fall lotrechter Flanschen des Spurkranzes.

Diese aus Abb. 31 und 32 abgeleiteten Beziehungen sind wohl zu unterscheiden von den Kräftewirkungen, die ausgelöst werden, wenn die Seitenkraft S das Rad im Punkte B senkrecht zur Längsrichtung der Schiene herausheben sollte. Die Bedingung ist nach Abb. 33

$$S \cdot \cos\alpha = P \cdot \sin\alpha + f \cdot (S \cdot \sin\alpha + P \cdot \cos\alpha) \quad (38)$$

Der wesentliche Unterschied zwischen den früher behandelten Fällen und diesem besteht darin, daß hier die Reibung beim Aufsteigen zu überwinden ist, d. h. ein großer Reibwert behindert das Aufsteigen des Rades, während dort gerade dann Aufsteigen des Rades durch Abwälzen eintritt, wenn die Reibung nicht überwunden werden kann, d. h. ein großer Reibungswert begünstigt das Aufsteigen. Abb. 33 stellt den Grenzfall dar, wenn der Anlaufwinkel $\varphi = 0$ ist, oder den Fall fest gebremster Räder.

Die Gleichungen (36), (37) und (38) geben umgeformt das Verhältnis der Seitenkraft zum Raddruck, wann bei gegebenem Neigungswinkel „α" des Flansches des Spurkranzes Aufsteigen des Rades eintritt:

Fall I Gleichung (36)

$$\frac{S}{P} = \frac{\sin^2\alpha}{\sin\alpha \cdot \cos\alpha + f} \quad (39)$$

Fall II Gleichung (37)

$$\frac{S}{P} = \frac{\sin^2\alpha - f \cdot \cos\alpha \sin\alpha}{\sin\alpha \cos\alpha + f \cdot (1 - \cos^2\alpha)} = \frac{\sin\alpha - f \cdot \cos\alpha}{\cos\alpha + f \cdot \sin\alpha} \quad (40)$$

Fall III Gleichung (38)

$$\frac{S}{P} = \frac{\sin\alpha + f \cdot \cos\alpha}{\cos\alpha - f \cdot \sin\alpha} \quad (41)$$

Aus Zusammenstellung I ist für drei verschiedene Reibwerte
f = 0,25, ungünstigst beobachteter Reibwert,
f = 0,15, mittlerer Reibwert,
f = 0,05, Reibwert bei geschmierten Flanschen

die Abhängigkeit des Verhältnisses $\frac{S}{P}$ vom Winkel „α" zu entnehmen. In Abb. 34 und 35 ist außerdem diese Abhängigkeit bildlich dargestellt. Die niedersten und daher maßgebenden Werte von $\frac{S}{P}$ liefert Fall II. Aus Abb. 35 ist auch aus dem Vergleich der Linien Fall II und III die entgegengesetzte Wirkung des Reibwertes zu erkennen (die Linien mit $f = 0{,}25$ liegen am weitesten voneinander entfernt). Weiter sieht man, daß die Linien Fall I höher liegen als die bezüglichen des Falles II, das heißt, die Sicherheit gegen Aufsteigen wird erhöht (wenn auch nicht wesentlich), wenn ein Aufsteigen, das heißt Entlasten der Fahrfläche des Schienenkopfes vermieden wird.

Hinsichtlich des Raddruckes P ist noch festzustellen, daß er im allgemeinen nicht gleich der halben Achslast sein wird, da die Schienenüberhöhung den Raddruck des äußeren Rades verkleinert und alle Kräfte, die nicht in Schienenhöhe auf das Fahrzeug wirken, ein Kippmoment bilden, die den Druck des äußeren Rades vergrößern. Nach Abb. 36 ergibt sich der Druck des maßgebenden Rades mit

$$P = \frac{G}{2} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot n_1 \cdot h}{s_r^2}\right) + \frac{1}{s_r} \cdot (F n_1 + D_z n_1 + Z_D n_2 \quad (42)$$

wobei h die Schienenüberhöhung n_1 und n_2 den Abstand der Angriffspunkte der Kräfte über Schienenoberkante bedeutet. Die Massenkräfte G, F und D_z greifen im Schwerpunkt, bzw. in der Schwerebene an (Abstand n_1) und Z_D die Zug- und Druckkräfte im Gestänge in Pufferhöhe (Abstand n_2). Aus Gleichung (42) ist zu ersehen, daß das Verhältnis $\frac{S}{P}$ bei großer Fahrgeschwindigkeit, also wachsenden Seitenkräften S unter Umständen kleiner sein kann, als bei geringer Geschwindigkeit, wenn der Schwerpunkt des Fahrzeuges hoch liegt, also n_1 größer wird. Neben andern Gründen ergibt sich aus dieser Ueberlegung die Regel, den Schwerpunkt der Fahrzeuge hoch zu legen.

IV. Zahlenbeispiele und Schlußfolgerungen.

An der Hand von Zahlenbeispielen sollen die vorstehenden Rechnungsergebnisse beleuchtet und daran die daraus zu ziehenden Schlußfolgerungen gegliedert werden. Die Auswahl der Fahrzeuge für die Zahlenbeispiele wurde so getroffen, daß besonders hervor-

Zusammenstellung I

	Werte von $\frac{S}{P}$								
	Fall I			Fall II			Fall III		
	f = 0,25	f = 0,15	f = 0,05	f = 0,25	f = 0,15	f = 0,05	f = 0,25	f = 0,15	f = 0,05
90	4,00	6,66	20,00	4,00	6,66	20,00	∞	∞	∞
80	2,30	3,03	4,38	2,24	2,98	4,38	∞	39,80	4,01
70	1,55	1,88	2,38	1,48	1,84	2,37	9,58	4,94	3,24
60	1,11	1,28	1,56	1,04	1,26	1,56	3,50	2,54	1,90
50	0,79	0,91	1,09	0,73	0,88	1,08	2,04	1,63	1,32
40	0,54	0,64	0,77	0,51	0,61	0,76	1,38	1,13	0,93
30	0,35	0,24	0,52	0,28	0,38	0,51	0,96	0,80	0,64
20	0,20	0,25	0,31	0,10	0,20	0,30	0,68	0,54	0,42
10	0,07	0,09	0,13	0,00	0,03	0,12	0,45	0,33	0,23
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,15	0,05

Zusammenstellung II.

	Bezeichnung des Fahrzeuges	Wagenlänge mm	Achsstand mm	Raddurchmesser mm	Leergewicht t	Vollgewicht t	Achsfolge	n_1 mm	n_2 mm	Anmerkung
I	Langholzwagen der Pr.-H. St.-B.	5 700	2 500	1 000	5,2	—	2,5	900	1 050	I Nr. 36, S. 742, Textabbildung 945, S. 758.
II	Kohlenwagen der Pr.-H. St.-B.	7 800	4 000	1 000	—	28,6	4,0	1 800	1 050	I Nr. 27, S. 742, Textabbildung 939, S 755.
III	Eilgutwagen der Bad. St.-B.	11 260	6 000	1 000	12,7	—	6,0	1 300	1 060	I Nr. 52, S. 768, Textabbildung 963, S. 773.
IV	Güterzugslokomotive der Pr.-H. St.-B	8 840	1 400 2 000	1 330	—	40,3	2,0 1,4	1 400	1 050	I Nr. 34, S. 59, Textabbildung 29, S. 27.
V	Durchgangswagen der Pr.-H. St.-B.	19 900	13 500 2 500	1 000	41,94	—	2,5 2,5 13,5	1 300	1 050	I Nr. 43, S 617, Textabbildung 717, S. 570

stechende Eigenschaften ihre verschiedene Wirkung zeigen. Die in Zusammenstellung II angeführten aus „Eisenbahntechnik der Gegenwart" entnommenen Fahrzeuge sollen Vertreter sein:

I. Für besonders leichtes Fahrzeug mit kleinem Achsstand.
II. Für ein besonders schweres Fahrzeug mit mittlerem Achsstand.
III. Für ein mittelschweres Fahrzeug mit besonders großem Achsstand.
IV. Für ein dreiachsiges Fahrzeug mit steifem Rahmen.
V. Für ein vierachsiges Fahrzeug mit Drehgestell,
a) bei kleiner Fahrgeschwindigkeit,
b) bei großer Fahrgeschwindigkeit.

Und zwar soll, um möglichst ungünstige Umstände hinsichtlich Entgleisungsgefahr zusammentreten zu lassen, das Durchfahren eines Weichenbogens von 180 m Halbmesser, ohne Ueberhöhung und ohne Uebergangsbogen bei einer für diesen Fall ungewöhnlich hohen Fahrgeschwindigkeit $v = 10$m/sek. ($V = 36$km/h) mit drückender Lokomotive in Betracht gezogen werden. Außerdem soll auch noch das vierachsige Fahrzeug bei einer Geschwindigkeit $v = 50$m/sek ($V = 180$km/h) auf freier Strecke im Bogenhalbmesser $R = 2000$ m behandelt werden, um den Einfluß großer Fahrgeschwindigkeit zu zeigen. Als Schublokomotive wird die Reihe 380 der österreichischen Bundesbahnen 1 E IV. |⎺ T-lokomotive angenommen, die bei 36km/h eine Zugkraft $Z = 12\,000$ kg zu leisten vermag[11]).

In Zusammenstellung III sind für dieselben Reibwerte f wie in Zusammenstellung I, das Verhältnis von Seitenkraft zu Raddruck $\frac{S}{P}$ angegeben, woraus sich durch Vergleich mit den dort gefundenen Werten, ein Maß der Sicherheit gegen Aufsteigen der Räder ergibt. Anschließend sind unter Annahme verschiedener Reibwerte und für verschiedene Neigungen des Flansches des Spurkranzes die Krümmungswiderstände ermittelt, und zwar um nicht außergewöhnliche Werte zu erhalten, unter der Vorausssetzung, daß sich das Fahrzeug in einem Bogen vom Halbmesser R, der der Geschwindigkeit entsprechend überhöht ist, gleichförmig in einem Zug mit ziehender und drückender Lokomotive fortbewegt, so daß nur die Lenkkraft L als Seitenkraft in Betracht zu ziehen ist[12]). Um Vergleiche mit der Formel von Röckl anstellen zu können, wurde für Wagen II der Krümmungswiderstand für verschiedene Bogenhalbmesser zusammengestellt.

Hinsichtlich der zahlenmäßigen Auswertung der Gleichungen zur Bildung der Summe aller Seitenkräfte ΣS beim Befahren des Weichenbogens ist bezüglich der Drehkräfte folgendes zu bemerken:

Es treten lediglich Drehkräfte D_z auf, da keine Ueberhöhungsrampen vorhanden sind. Nach Gleichung (26) ist D_z mit der Krümmungszunahme $\frac{dK}{ds}$ und mit dem Trägheitsmoment des Fahrzeuges um die lotrechte Achse J_z wachsend. Bei der Fahrt in einem Bogen ohne Uebergang bildet der Achsstand die Uebergangslänge, d. h. die Krümmung nimmt von Null bis $\frac{1}{R}$ zu, von dem Augenblick, wo die erste Achse den Bogenanfang überschritten, bis zu dem Augenblick, wo die zweite Achse den Bogenanfang erreicht hat. Bei gradliniger Zunahme der Krümmung ist $K = \frac{1}{R \cdot a} \cdot s$, nimmt also von $s = 0$ mit $K = 0$ bis $s = a$ mit $K = \frac{1}{R}$ zu. Aus $\frac{dK}{ds} = \frac{1}{R \cdot a}$ und Gleichung (26) kann man den Vorteil großer Achsstände erkennen, da die Seitenkräfte mit dem Quadrat des Achsstandes abnehmen (Schlingerbewegung in der Geraden).

[11]) Siehe Organ 1922, Seite 191.

[12]) Unter Zugrundelegung von $L + F + D_z$ als Seitenkraft S kann ebenso auch der Widerstand in Weichenbogen gerechnet werden.

Zusammenstellung III.

Fahrzeug	Bogenhalbm. m	Fahrgeschw.	Reibwert „f"	L kg	R_Z kg	F kg	Z_D kg	D_Z kg	ΣS kg	P kg	$\frac{S}{P}$	W_L	W_R	W_S $\alpha = 60^0$	W_S $\alpha = 70^0$	W_S $\alpha = 80^0$	$\Sigma W = W_L + W_R + W_S$ $\alpha = 60^0$	$\alpha = 70^0$	$\alpha = 80^0$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
I	180	$v = 10$ m/sek $V = 36$ km/h	0,25	650	3,3				1120		0,70	1,74	1,04	0,75	1,19	2,46	3,53	3,97	5,24
			0,15	390	2,0	148	190	128	858	1300 + 300 = 1600	0,53	1,04	0,62	0,27	0,43	0,89	1,93	2,09	2,55
			0,05	130	0,7				597		0,37	0,35	0,21	0,03	0,05	0,10	0,59	0,61	0,66
II	180		0,25	3570	11,2				5470		0,61	2,78	1,04	1,20	1,90	3,93	5,02	5,72	7,75
			0,15	2140	6,7	813	260	518	3740	7150 + 1780 = 8930	0,42	1,67	0,62	0,43	0,69	1,42	2,72	2,98	3,47
			0,05	713	2,2				2306		0,26	0,55	0,21	0,05	0,08	0,16	0,81	0,84	0,92
	300		0,25	3570	6,7							1,66	0,63	0,72	1,14	2,36	3,01	3,43	4,65
			0,15	2140	4,0	—	—	—	—	—	—	1,00	0,37	0,26	0,41	0,85	1,63	1,78	2,22
			0,05	713	1,3							0,33	0,13	0,03	0,05	0,10	0,49	0,51	0,56
	500		0,25	3570	4,2							1,00	0,37	0,43	0,69	1,42	1,80	2,06	2,79
			0,15	2140	2,4	—	—	—	—	—	—	0,60	0,22	0,16	0,25	0,51	0,98	1,07	1,33
			0,05	713	0,8							0,20	0,07	0,02	0,03	0,06	0,29	0,30	0,33
	1000		0,25	3570								0,50	0,19	0,22	0,34	0,71	0,91	1,03	1,40
			0,15	2140	—	—	—	—	—	—	—	0,30	0,11	0,08	0,12	0,26	0,49	0,53	0,67
			0,05	713								0,10	0,04	0,01	0,01	0,03	0,15	0,15	0,17
III	180		0,25	1590	3,3				2545		0,66	4,16	1,04	1,80	2,86	5,90	7,00	8,06	11,10
			0,15	950	2,0	360	380	212	1904	3175 + 763 = 3938	0,48	2,50	0,62	0,65	1,04	2,13	3,77	4,16	5,25
			0,05	318	0,7				1271		0,32	0,83	0,21	0,08	0,12	0,24	1,12	1,16	1,28
IV	180		0,25	4680	18,8				7343		0,81	2,20	1,04	0,48	0,75	1,56	3,72	3,99	4,80
			0,15	2810	11,3	380	294	1970	5465	6650 + 2420 = 9070	0,60	1,32	0,62	0,17	0,27	0,56	2,11	2,21	2,50
			0,05	938	3,8				3568		0,39	0,44	0,21	0,02	0,03	0,06	0,67	0,68	0,71
V	180		0,25	2630	13,2				3971		0,63	1,74	1,04	0,75	1,19	2,46	3,53	3,97	5,24
			0,15	1575	7,9	600	332	296	2811	5250 + 1010 = 6260	0,45	1,04	0,62	0,27	0,43	0,89	1,93	2,09	2,55
			0,05	525	2,6				1756		0,28	0,35	0,21	0,03	0,05	0,10	0,59	0,61	0,66
	2000	$v = 50$ m/sek $V = 180$ km/h	0,25	2630	1,2				4086			0,16	0,09	0,07	0,11	0,22	0,32	0,36	0,47
			0,15	1575	0,7	1340	—	115	3031	—	—	0,09	0,06	0,02	0,04	0,08	0,17	0,19	0,23
			0,05	525	0,2				1980			0,03	0,02	0,00	0,00	0,01	0,05	0,05	0,06

Für das Fahrzeug V, $v = 50$m/sek wurde Linienführung mit stetigem Krümmungsverlauf und $\frac{dK}{dx} = 0{,}0000064$ angenommen[13]).

Das Trägheitsmoment der Fahrzeuge wird schätzungsweise mit

$$J_z = \frac{Q}{g} \cdot \frac{l^2 \sqrt{3}}{6}$$

angenommen, wobei Q das Gewicht in kg, g die Beschleunigung der Schwere, l die Wagenlänge bedeutet. Die Schätzungsformel ist aus folgender Ueberlegung hervorgegangen:

Wäre die Masse des Fahrzeuges gleichmäßig über die rechteckige Grundrißfläche verteilt, dann wäre

$$J_z = \frac{Q}{g} \cdot \frac{(l^2 + b^2)\sqrt{3}}{6},$$

wenn b die Wagenbreite bezeichnet. Da jedoch die Achssätze bei den zweiachsigen Wagen innerhalb des Trägheitshalbmessers

$$\frac{l^2 + b^2}{6} \cdot \sqrt{3}$$

liegen, wurde zum Ausgleich der Trägheitshalbmesser mit $\frac{l^2}{6} \cdot \sqrt{3}$ geschätzt.

Die Zahlenwerte der Zusammenstellung III lassen folgendes erkennen:

Die Seitenkräfte am führenden Vorderrade werden durch das feste Aufkeilen der Räder beinahe gar nicht beeinflußt, R_z ist gegenüber L verschwindend klein. Auch die Fliehkräfte sind bei kleinen Fahrgeschwindigkeiten klein im Vergleich zur Lenkkraft, erreichen jedoch bei großen Geschwindigkeiten eine der Lenkkraft gleichwertige Größe. Der Einfluß der Seitendruckkräfte Z_D ist bei leichten Wagen überwiegend, sie sollen daher in die Mitte des Zuges eingeordnet werden. Der große Einfluß der Drehkräfte D_z bei kleinem Achsstand und großem Gewicht zeigt sich bei Fahrzeug IV.

Das günstigste Verhältnis $\frac{S}{P}$ also die größte Sicherheit gegen Aufsteigen zeigt der schwere Kohlenwagen mit hoch liegendem Schwerpunkt. Das ungünstigste die dreiachsige Lokomotive mit steifem Rahmen und tiefliegendem Schwerpunkt. Die Sicherheit gegen Aufsteigen würde bei 60° Neigung des Flansches des Spurkranzes und dem Reibwert $f = 0{,}25$ zwischen

$$n = \frac{1{,}11}{0{,}61} = 1{,}8 \quad \text{und} \quad n = \frac{1{,}11}{0{,}81} = 1{,}36$$

liegen. Dies scheinen auch trotz der Zugrundelegung sehr ungünstiger Verhältnisse kleine Sicherheiten zu sein, wenn nicht die Annahme zu rechtfertigen wäre, daß der Reibwert $f = 0{,}25$, wie ihn z. B. Boedecker annimmt, so hoch ist. Galton[14]) findet für den Reibwert zwischen Stahlreifen und Stahlschiene einen Wert $f = 0{,}242$ bei der Geschwindigkeit Null und $f = 0{,}088$ bei $V = 10$km/h, ebenso lassen die Versuche von Wichert[15]) erkennen, daß der Reibwert vom Uebergang aus der Ruhe in die Bewegung stark abnimmt. Da bei allen Gleitbewegungen zwischen Rad und Schiene tatsächliche Verschiebung der berührenden Flächen eintritt, kann insbesondere bei großen Geschwindigkeiten mit viel kleineren Reibwerten gerechnet werden als 0,25, das vielleicht als oberste Grenze gelten kann[16]).

Daß die Annahme von $f = 0{,}25$ im allgemeinen zu hoch sein dürfte, lassen auch die ermittelten Zahlenwerte für den Krümmungswiderstand erkennen.

Für $f = 0{,}25$ sind die errechneten Werte alle größer, als die Formel von Röckl ergibt (Abb. 37), während umgekehrt die rechnerischen Werte kleiner sein sollten als die Versuche ergeben, da hier alle Unregelmäßigkeiten und zufälligen Einwirkungen immer im ungünstigen Sinne also Widerstand vergrößernd einwirken, und weil der Spurkranz die Schiene nicht in einem Punkte berührt, wie die Rechnung annimmt, sondern mit ihr in einer Berührungsfläche zusammenarbeitet, deren Punkte alle verschiedene und jedenfalls größere Relativgeschwindigkeiten haben, was ebenso den tatsächlichen Krümmungswiderstand größer macht, als ihn die Rechnung ergeben kann.

Aus allen diesen Gründen kann gefolgert werden, daß der Reibwert bei kleinen und mittleren Geschwindigkeiten zwischen 0,20 und 0,15 liegen, bei großen Geschwindigkeiten noch kleiner sein dürfte.

Die Sicherheit gegen Aufsteigen würde dann größer erscheinen und für die beiden obigen Grenzfälle

$$n = \frac{1{,}28}{0{,}61} = 2{,}1 \quad \text{und} \quad n = \frac{1{,}28}{0{,}81} = 1{,}6$$

betragen.

Auch diese Sicherheiten sind nicht sehr groß, und es läßt sich daraus folgern, daß die gebräuchliche und bewährte Neigung des Flansches des Spurkranzes von 60° nicht weiter verflacht werden sollte, ohne besondere Vorkehrungen zu treffen. Dagegen wäre bei Bahnen mit großen Bogenhalbmessern eine Versteilung auf 70° hinsichtlich der dadurch erhöhten Sicherheit gegen Aufsteigen der Räder nicht unangebracht, da der Krümmungswiderstand in diesem Bereich sich nur wenig vergrößert, die Sicherheit gegen Aufsteigen sich dagegen auf

$$n = \frac{1{,}88}{0{,}61} = 3{,}1 \text{ bzw. } n = \frac{1{,}88}{0{,}81} = 2{,}3$$

erhöht, was bei schlechter Erhaltung des Oberbaues oder großer Fahrgeschwindigkeit eine Rolle spielen mag[17]).

Bezüglich des Krümmungswiderstandes wurde zum Vergleich mit der Formel von Röckl: a) für Hauptbahnen, b) für Lokalbahnen, die Widerstandszahlen des Fahrzeuges II mit $\alpha = 70°$ (mittlere Abnützung des Spurkranzes angenommen) in Abb. 37 in Abhängigkeit vom Bogenhalbmesser aufgetragen. Der Vergleich zeigt, daß die Formeln von Röckl bei den großen Halbmessern mit der Linie $f = 0{,}15$ beinahe übereinstimmen, bei kleinen Halbmessern steigt die Linie von Röckl stärker an. (Die Linie (a) gibt unter 300 m Halbmesser zu große Werte und hat nur bis zu dieser Grenze Gültigkeit). Das stärkere Ansteigen der Linien von Röckl kommt daher, daß bei den Versuchen, auf die sich die Formel stützt, die Bogen mit großen Halbmessern viel länger mit großer Geschwindig-

---

[13]) Siehe „Gestaltung des Gleises für große Fahrgeschwindigkeit", Organ 1922, S. 300.

[14]) Siehe „Hütte", 20. Auflage, S. 230.

[15]) Zentralblatt der Bauverwaltung 1894, S. 73.

[16]) Daß der Reibwert beim Uebergang aus der Bewegung in die Ruhe plötzlich höhere Werte annimmt, läßt eine Erscheinung erklären, die sich bei Versuchen französischer Bahnen mit freien, nicht fest auf die Achsen gekeilten Rädern gezeigt hat. Die Fahrzeuge entgleisten so oft, daß die Versuche wieder aufgegeben wurden. Die Erklärung ist darin zu suchen, daß das Außenrad, wenn es sich unabhängig vom Innenrad drehen kann, unbehindert von diesem nach aufwärts sich abwälzen kann, ohne zu gleiten, wobei der Reibwert „der Ruhe" zur Geltung kommt, der große Werte annehmen kann, also vergleichsweise kleinere Seitenkräfte genügen, das Rad zum Aufsteigen zu bringen, als bei fest aufgekeilten Rädern, wo durch die zwangläufig sich drehenden Räder immer wieder Gleiten des Außenrades erzwungen wird, was den Reibwert herabsetzt und die Sicherheit gegen Aufsteigen erhöht.

[17]) In Rußland, Schweden und Amerika sind größere Neigungen des Flansches des Spurkranzes als 60° gebräuchlich.

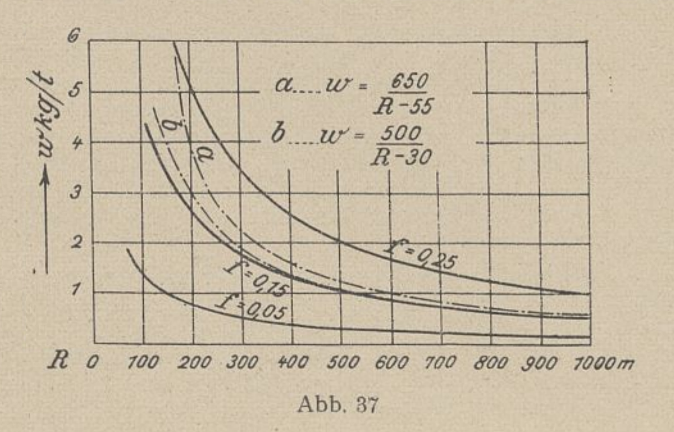


Abb. 37

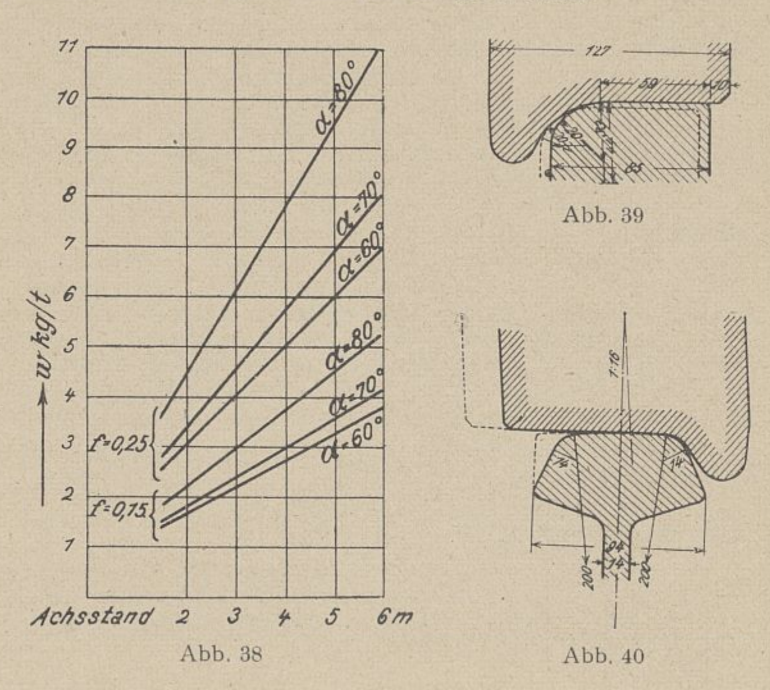


Abb. 38

Abb. 39

Abb. 40

keit befahren wurden und der durchschnittliche Reibwert daher kleiner war als bei Bogen mit kleinem Halbmesser.

Um den Einfluß von Achsstand, Reibwert und Neigungswinkel des Flansches des Spurkranzes auf den Krümmungswiderstand zu zeigen, wurden die erhaltenen Zahlenwerte des Fahrzeuges I, II, III für den Halbmesser $R = 180$ m in Abb. 38 aufgetragen. Daraus ist insbesondere der große Einfluß starker Neigung (Scharflaufen) des Flansches des Spurkranzes bei großen Reibwerten zu ersehen; es ist daher begründet, in erster Linie die Spurkränze der führenden Räder der Lokomotiven zu schmieren, die sich am raschesten scharf laufen, wodurch der Krümmungswiderstand wesentlich herabgesetzt werden kann und gleichzeitig die Gefahr des Aufsteigens vermindert wird. Die Widerstandszahlen gelten für steifachsige Fahrzeuge, während sich bei Lenkachsen der Widerstand nach Maßgabe der Einstellung der Achsen in den Bogenhalbmesser verkleinert.

Die bisherigen Betrachtungen lassen Schlußfolgerungen auf die Gestaltung des Querschnittes von Schiene und Radreifen zu.

Zunächst soll der Vorschlag von Wöhler[18]) und die Vor- und Nachteile der von ihm vorgeschlagenen Form des Radreifens (Abb. Nr. 39) klargelegt werden. Das wesentliche seines Vorschlages besteht darin, daß der Radreifen walzenförmigen Querschnitt und die Hohlkehle einen bedeutend größeren Halbmesser hat als der Schienenkopf, der eben und so breit ist, daß die Wahl eines Hutquerschnittes für die Schiene angezeigt erschien.

Die Form der Hohlkehle muß als die günstigst mögliche hinsichtlich des Krümmungswiderstandes bezeichnet werden, da das Außenrad in Krümmungen nur so weit aufklettert, als der jeweiligen Seitenkraft entspricht, „die Neigung des Flansches" sich also „selbsttätig" auf den kleinsten Wert einstellt, wodurch auch der Krümmungswiderstand seinen kleinsten Wert annimmt.

Nicht günstig ist der Querschnitt jedoch hinsichtlich Abnützung zwischen Rad und Schiene. Durch das Abheben des Rades von der Fahrfläche des Schienenkopfes (die ——— gezeichnete Stellung in Abb. 40) tritt in der Hohlkehle große Flächenpressung und damit große Abnützung auf. Während der Krümmungswiderstand verhältnisgleich der Reibungsarbeit ist, hängt die Abnützung von der Reibungsarbeit und gleichzeitig von der Flächenpressung ab. D. h. auch bei kleiner Reibungsarbeit kann bei großer Flächenpressung große Abnützung entstehen und umgekehrt kann auch große Reibungsarbeit bei genügend kleiner Flächenpressung nicht in Abnützung, sondern in Wärme umgesetzt werden.

Verkleinerung des Krümmungswiderstandes und Herabsetzung der Flächenpressung und Abnützung stellen daher teilweise entgegengesetzte Anforderungen an die Gestaltung des Querschnittes der Radreifen, und es gilt somit den richtigen Ausgleich zwischen diesen Gegensätzen zu finden. Zunächst muß festgestellt werden, daß der walzenförmige Radreifen, wie ihn Wöhler vorschlägt, hinsichtlich Flächenpressung wesentlich günstiger ist als die Kegelform, da die Verpressungsfläche dort ein Rechteck, hier ein Kreis ist (rechnerisch eine Linie, bzw. ein Punkt) und der Flächenunterschied um so größer sein wird, je härter der Baustoff von Rad und Schiene ist. Um nun auch in der Hohlkehle geringe Abnützung zu erreichen, ist es notwendig, zur Vergrößerung der Berührungsflächen die Ausrundung von Rad und Schiene gleich und mit möglichst großem Halbmesser zu gestalten. Ungleiche Halbmesser verursachen zunächst große Abnützung in der Hohlkehle, bis die Ausrundungen gleich sind[19]). Bei der Regelform, wo die Ausrundungen 14 und 15 mm betragen, tritt dieser Zustand schon nach einigen hundert Kilometern zurückgelegten Weges ein, das Rad steigt dann nicht mehr in der Hohlkehle auf, auch die Schienenkopffahrfläche ist belastet, und die Abnützung schreitet bei kleinerer Flächenpressung langsamer weiter fort. Daß die Abstützung des führenden Außenrades in der Hohlkehle stattfindet, ist also nicht, wie vielfach angenommen wird,[20]) die Regel, sondern eine Ausnahme (ganz neue Räder), denn erfolgte die Abstützung der Räder für gewöhnlich wirklich in der Hohlkehle, so müßte die Fahrfläche des Kopfes der Außenschiene weniger abgenützt sein als die der Innenschiene, ja die Abnützung müßte sogar weniger betragen als in der Geraden, was aber erfahrungsgemäß nicht der Fall ist. Daraus kann gefolgert werden, daß es bezüglich Abnützung vorteilhaft ist, die Ausrundung von Rad und Schiene von vornherein gleich zu machen, da die größere Ausrundung des Radreifens stärkere Abnützung hervorruft und ohnehin nur ganz kurze Zeit erhalten bleibt. Der Unterschied von 1 mm (15—14 mm beim Regelquerschnitt) kann aus Ausführungsgründen beibehalten werden, da sich die Gleichheit ohne großen Stoffverlust bald herstellt, und kleinere Ausrundung des Radreifens auf jeden Fall zu vermeiden ist.

Für die Neigung des Flansches des Spurkranzes wurde ein Winkel von 60° (in besonderen Fällen bis 70°) als zweckmäßig erkannt. Werden die Seitenflächen des Schienenkopfes, wie jetzt allgemein üblich, lotrecht ausgeführt, so laufen sich die Räder scharf, und die Schienen nützen sich in Bogen schräg ab, wie Abb. 30b zeigt. Schiene und Radreifen suchen also sich gegenseitig ihren Querschnitt aufzuzwingen. Da dieser Zustand der Gleichheit aber nie eintreten kann, weil immer verschiedene Grade der Abnützung aufeinander treffen, berühren sich Rad und Schiene auch seitlich wieder nur in kleinen Flächen, große Flächenpressung und Abnützung sind die Folge. Da die Notwendigkeit der Neigung des Flansches des Spurkranzes erkannt ist, liegt der Gedanke nahe, der Seitenfläche des Schienenkopfes dieselbe Neigung zu geben (Abb. 30c). Dadurch würde die seitliche Anlagefläche des Rades an die Schiene vergrößert, der Flächendruck verkleinert, die Abnützung würde daher kleiner sein und stetig fortschreiten, da die ursprüngliche Form von Rad und Schiene immer erhalten bliebe. Die große wirtschaftliche Bedeutung dieser Erkenntnis würde darin zum Ausdruck kommen, daß das Abdrehen der Achssätze, um die Regelform wieder herzustellen, viel weniger oft stattfinden müßte und mit viel weniger Stoffverschleiß verbunden wäre als jetzt.

Es ist nun zu untersuchen, ob und inwieweit es möglich wäre, einerseits bei den bestehenden Bahnen, andererseits bei neuen Bahnen mit eigenem Fahrpark die entwickelten Grundsätze anzuwenden.

Durch die Neigung der Seitenflächen des Schienenkopfes würde zunächst der Krümmungswiderstand vergrößert werden, da die tieferen Punkte des Spurkranzes, die nun mit der Schiene in Berührung kommen, größere Relativgeschwindigkeit dieser gegenüber haben. Dieser Zuwachs wäre aber nicht so groß, wie der, welcher durch das Scharflaufen der Räder entsteht (aus Abb. 28 erkennt man, daß die Geschwindigkeiten immer kleiner werden, je näher der Berührungspunkt gegen den Stützpunkt rückt $\overline{4'5'} > \overline{5'6'} > \overline{6'7'}$), so daß der Gesamtwiderstand bei durchschnittlichem Ablauf kleiner wäre als jetzt. Da auf den bestehenden Bahnen Fahrzeuge mit verschieden stark scharfgelaufenen Rädern verkehren, könnte ein plötzlicher Uebergang nicht erfolgen, ein erster Schritt zur Besserung der Abnützungsverhältnisse zwischen Rad und Schiene wäre aber gemacht, wenn man den Seitenflächen des Schienenkopfes eine Neigung von der mittleren Abnützung, die durch Messung zu finden wäre, geben würde. Dadurch könnte erreicht werden, daß nach einem Zeitraum von fünf bis zehn Jahren die mittlere Abnützung der Radreifen zurückgegangen sein wird, worauf bei Schienenneulagen eine weitere Verflachung des Neigungswinkels einsetzen kann.

Die Sicherheit gegen Aufsteigen der Räder wird durch die Neigung der Seitenflächen des Schienenkopfes nicht vermindert, da es gleichgültig sein muß, ob das Rad oder die Schiene die betreffende Neigung hat, dagegen sind scharfgelaufene Räder, die durch die Neigung der Seitenflächen des Schienenkopfes vermieden würden, nicht nur schlecht hinsichtlich des Krümmungswiderstandes, sondern auch gefährlich, da sie bei außergewöhnlichen Seitenstößen, die nur kurze Zeit wirken, aber von besonderer Größe sind, das Aufsteigen begünstigen, weil der Anlaufpunkt weit vor dem Stützpunkt liegt, wodurch das Rad, wenn es um jenen Punkt kippt, rasch die Schienenoberkante erstiegen hat, während dies bei flacheren Neigungswinkeln so lange braucht, bis die Wirkung des außergewöhnlichen Seitenstoßes schon wieder vorbei ist.

Die hinsichtlich Abnützung als günstig erkannte Walzenform der Radreifen wird sich bei den bestehenden Bahnen Mitteleuropas nicht einführen lassen (alle bisherigen Versuche sind auch immer wieder aufgegeben worden). Kegelräder haben nämlich den Vorteil, bei den Schlingerbewegungen der Fahrzeuge die Seitenstöße zu dämpfen, was bei den zwei- und dreiachsigen Fahrzeugen, die in Mitteleuropa die Regel sind, eine große Rolle spielt, da sie seitlich nicht so gut abgefedert sind wie Drehgestellwagen. Weiter begünstigt die Kegelform der Räder das Einstellen der freien Lenkachsen in die richtige Lage, da bei Spießgangstellung das äußere Rad der Vorderachse und das innere Rad der Hinterachse, wenn die Räder Kegelform besitzen, voreilen und so die Einstellung der Achsen in die Richtung des Bogenhalbmessers fördern. In Amerika, wo hauptsächlich Drehgestellwagen laufen, hat die Walzenform der Räder Eingang gefunden und wird dort ihre Vorteile auch zur Geltung bringen können.

Für die bestehenden Bahnen wird daher der jetzt übliche Querschnitt der Radreifen beizubehalten sein, während die Seitenflächen des Schienenkopfes zu neigen wären (nach früherem schätzungsweise 70°, Abb. 40). Da mit Beibehaltung einer genügenden Breite der Fahrfläche der untere Teil des Schienenkopfes sehr breit wird, kommt man auf den schon von Wöhler vorgeschlagenen Hutquer-

[18]) „Schienenkopf und Radreifenprofil", Zentralblatt der Bauverwaltung 1884, S. 177.

[19]) Siehe die Abnützung der Versuchsprofile im Zentralblatt der Bauverwaltung 1884, S. 177.

[20]) Während Boedecker seinen Berechnungen die Abstützung des Rades in der Hohlkehle zu Grunde legt, weist Uebelacker auf die durch die Aenderung der Abstützung bedingten Abweichungen hin: Organ 1903, Beilage, S. 5.

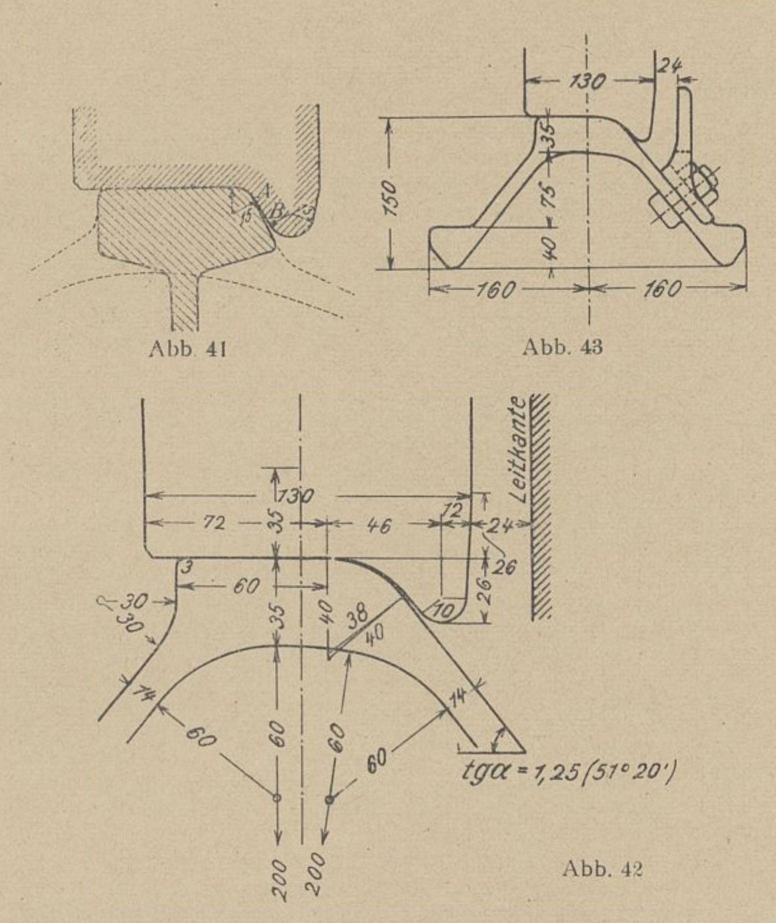


Abb. 41

Abb. 43

Abb. 42

schnitt zurück, eine Form, die sich auch aus anderen Gründen als zweckmäßig erweist[21]).

Für neue in sich geschlossene Bahnen mit eigenem Fahrpark wäre zu erwägen, ob vierachsige Wagen mit Drehgestellen, die vergleichsweise zwar teurer sind als zwei- und dreiachsige Wagen, nicht vorzuziehen wären, da dann der Einführung walzenförmiger Räder nichts mehr im Wege steht und die Mehrkosten des Fahrparkes sich in der geringeren Abnützung von Rädern und Schienen ausgleichen würde. Sind diese Bahnen außerdem elektrisch betrieben und können dadurch mehrachsige Fahrzeuge mit steifem Rahmen vermieden werden, dann ist man auch bei kleinen Bogenhalbmessern nicht gezwungen, Spurerweiterungen zu machen[22]), was für sichere Führung und gleichmäßiges Zusammenarbeiten von Rad und Schiene sehr von Vorteil ist. Die Neigung der Seitenflächen des Schienenkopfes kann nun sofort der des Rades angeglichen werden, nur wird man aus Ausführungsgründen die Neigung der Seitenflächen des Schienenkopfes etwas steiler machen. Der günstigste Winkelunterschied, der sich aus der Erfahrung, je nach der Art der Krümmungsverhältnisse der Bahn, ergeben würde, könnte zunächst 2 bis 3 Grad angenommen werden (Abb. 41). Die Ausrundung des Schienenkopfes und des Radreifens sollen gleich und möglichst groß sein. Der Vergrößerung des Ausrundungshalbmessers wird durch die notwendige Sicherheitsstrecke AB (Abb. 41) eine Grenze gesetzt, da die Sicherheit gegen Aufsteigen um so größer ist, je länger der Flansch des Spurkranzes die große Neigung hat. Bei gegebener Höhe des Spurkranzes ist also zwischen diesen gegensätzlichen Anforderungen der richtige Ausgleich zu treffen, den die Regelform mit $r = 15$ mm gut getroffen zu haben scheint.

Die Breite des Schienenkopfes ist bei walzenförmigen Reifen von um so größerer Bedeutung und sollte so groß sein, daß ein Hohllaufen des Radreifens unmöglich ist. Dies ist erreicht, wenn die äußerste Kante des Radreifens den Schienenkopf nicht mehr überragt, als der Querbeweglichkeit der Achssätze im Gleis entspricht. Dadurch kommt man zu großen Schienenkopfbreiten, die die Hutform der Schiene um so günstiger erscheinen lassen als bei dieser Form im Gegensatz zur Einstegschiene plötzliche Querschnittsänderungen vermieden werden können (Abb. 41).

Am günstigsten kann Schiene und Radreifen gestaltet werden, wenn man die Führung des Rades und die Sicherung gegen Aufsteigen verschiedenen Bauteilen zuweist. Bei Fernschnellbahnen mit mehr als 150 km/h Geschwindigkeit wird man den Zug wegen der

[21]) Siehe „Ein neuer Vorschlag für einen Oberbau mit Schwellenschienen auf Querschwellen", Organ 1922, S. 203, und „Gestaltung des Gleises bei großer Fahrgeschwindigkeit", Organ 1922, S. 297.

[22]) Petersen: Die Gestaltung der Bogen im Eisenbahngleise, Organ 1920, S. 63.

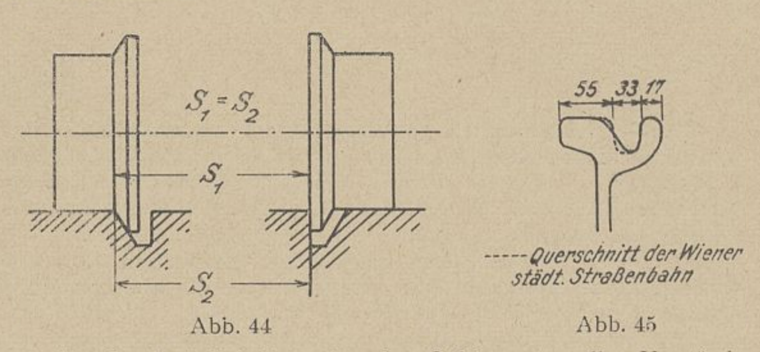


Abb. 44

Abb. 45

mit der Geschwindigkeit wachsenden Gefahr unter allen Umständen gegen Entgleisen sichern wollen, und Leitschienen nicht entbehren können. Dann genügt aber für die Spurkranzführung eine 1,1- bis 1,2-fache Sicherheit gegen Aufsteigen, damit das Rad bei gewöhnlichen Verhältnissen noch durch den Spurkranz geführt wird, während außergewöhnliche Seitenkräfte durch die Leitschienen aufgenommen werden, nachdem das anlaufende Außenrad schon aufgestiegen ist[23]). Es würde dann nach Zusammenstellung I eine Neigung von 50°, vielleicht sogar 45° genügen, das Rad zu führen. Dadurch würde der Krümmungswiderstand kleiner und auch die Abnützung, weil jetzt außerdem noch auf die Sicherheitsstrecke AB verzichtet und der Halbmesser der Ausrundung vergrößert werden kann, wodurch die Abwälzungsverhältnisse noch weiter verbessert werden. Abb. 42 zeigt den nach diesen Erwägungen geformten Schienenkopf und Radreifen. Die erforderlichen Leitschienen würden bei Anwendung der vom Verfasser vorgeschlagenen Schwellenschiene mit geringem Baustoffaufwand herzustellen sein (Abb. 43) im Gegensatz zum üblichen Querschwellenoberbau, wo die Leitschienen ein in sich biegungssteifer Träger sein müßten, der einen für gewöhnlich unausgenützten Bauteil darstellen würde[24]).

Die entwickelten Grundsätze gelten auch für den Rillenschienenoberbau bei Straßenbahnen, nur kann hier im Gegensatz zu den Maßverhältnissen in Abb. 42 und 43 die Leitkante nicht nur die Aufgabe haben, das Fahrzeug bei ungewöhnlichen Seitenkräften gegen Entgleisen zu schützen, sondern wird bei dem gewöhnlichen Laufe der Achssätze angefahren, weil man die Spurrille nicht so breit machen kann, wie erforderlich wäre, um dauernd also auch bei abgenützten Rädern und Schienen die Führung der Hohlkehle des Rades zuzuweisen.

Es ist daher wegen gleichmäßiger und kleinerer Abnützung angezeigt, bei neuen Achssätzen den Spielraum im Gleis so zu bemessen, daß die Spurkränze der Räder in der äußersten Stellung sowohl an der Fahrkante als auch an der Leitkante anliegen (Abb. 44), obwohl der Krümmungswiderstand zunächst dadurch erhöht wird[25]). Bei eingepflasterten Gleisen kann wohl nur die jetzt übliche hohe Mittelstegschiene trotz ihres schweren Nachteils der Begünstigung der Riffelbildung in Betracht kommen, da sich diese Bauart der Pflasterung am besten anschmiegt. Abb. 45 zeigt den Querschnitt des Kopfes einer nach obigen Grundsätzen gestalteten Rillenschiene[26]). Der Nachteil der kleineren Fahrkopfbreite wird bei Straßenbahnen wegen der bedeutend kleineren Raddrücke nicht so ins Gewicht fallen, so daß auch hier mit bedeutenden Ersparnissen hinsichtlich Gleis- und Radreifenerhaltung sowie im Betriebe der Radsatzdrehereien gerechnet werden könnte.

[23]) Es wäre unzweckmäßig, die Leitschiene so nahe zu rücken, daß das Rad von der Leitschiene geführt würde, da nach Abb. 28 wegen des großen Reibungsweges eine bedeutende Vergrößerung des Krümmungswiderstandes die Folge wäre. Siehe auch: Bräuning: „Die Grundlagen des Gleisbaues", Berlin 1920, S. 27.

[24]) Die Anordnung der Leitschienen bei der Versuchsstrecke Marienfelde—Zossen dürfte jedenfalls nur als Notbehelf angesehen werden, da sich mit weit weniger aber richtig zusammengefaßtem Baustoffaufwand viel leistungsfähigere Gleise erzielen lassen.

[25]) Siehe auch: Hartmann: „Die Räderpaare im Bogengleis beim Rillenschienenoberbau", Verkehrstechnik Mai-Juni 1921, S. 2 der Einlage.

[26]) Verfasser hatte in letzter Zeit Gelegenheit, bei einer Schienenneulage am Karlsplatz in Wien zu beobachten, wie das gestrichelt gezeichnete Profil (Abb. 45) bereits nach 3 Tagen Betriebsdauer ungefähr 10 mm² seitlich schrägen Ablauf zeigte (bei dieser Beanspruchung kann man schon von Abfräsen sprechen), der sich nach zweimonatiger Betriebsdauer auf ungefähr 50 mm² erhöhte. Der Querschnitt des Radreifens war dann bereits vollkommen in den Schienenkopf eingefahren. Es ist daher augenscheinlich zwecklos, der Schiene eine Form zu geben, die nicht einmal kurze Zeit hindurch erhalten bleibt, selbst dann nicht, wenn diese Form die theoretisch oder praktisch bessere wäre, was übrigens nach früherem gar nicht der Fall ist.

Bücherschau.

Grundwasserkundliche Forschungen in Nordamerika. The occurrence of ground water in the United States with a discussion of principles. Von Oscar Edward Meinzer. Department of the Interior, United States Geological Survey. Water-Supply Paper 489. Washington, government printing office 1923. 321 S. in 8⁰.

Der Verfasser, dem eine Anzahl von Mitarbeitern zur Seite stand, gibt einen klaren und für weitere Kreise verständlichen Abriß eines Teils der Grundwasserkunde von Nordamerika. Es ist für uns lehrreich, seine auf amerikanischen Untersuchungen aufgebauten Anschauungen kennen zu lernen. In dem vorliegenden Werk werden die Porigkeit der Gesteine und Böden und die Verfahren zu ihrer Bestimmung eingehend behandelt. Die Zwischenräume zwischen den Poren werden unterschieden in überkapillare, die zu weit sind, um das Wasser durch molekulare Anziehung zu halten oder zu heben, in kapillare und in unterkapillare; in diesen ist die Adhäsion so groß, daß sich das Wasser im allgemeinen nicht mehr fortbewegt. In der Erdrinde unterscheidet der Verfasser a) eine lufthaltige Zone (Zone of aeration), b) eine Sättigungszone (Zone of saturation), in der sämtliche Poren des Bodens mit Wasser erfüllt sind. Undurchlässige Gesteine können in beiden Zonen vorkommen, bilden aber in beiden untätige Teile.

An den meisten Stellen ist nur eine Sättigungszone vorhanden; aber in gewissen Gebieten wird das Wasser auf seinem Wege abwärts bereits oberhalb des allgemeinen Grundwasserspiegels durch eine undurchlässige oder nahezu undurchlässige Schicht so aufgehalten, daß sich dauernd oder vorübergehend eine obere Sättigungszone bildet, unter der eine zweite lufthaltige Zone folgt; diese ist bei einem Beispiel in Utah Hunderte von Metern mächtig.

Die Oberfläche der Sättigungszone in durchlässigen Böden oder Gesteinen wird als Wasserspiegel (water table) bezeichnet; über ihm liegt der „Kapillarsaum", dessen Dicke der Verfasser mit 0,80 bis 2,40 m maß. Wenn die Temperatur steigt, wird die Oberflächenspannung vermindert und so etwas Kapillarwasser zum Wasserspiegel herabgezogen und der Sättigungszone zugefügt, umgekehrt, wenn die Temperatur fällt.

Das unterirdische Wasser in der Sättigungszone heißt Grundwasser oder „phreatisches Wasser"; das unterirdische Wasser in der lufthaltigen Zone heißt Haftwasser.

In größeren Tiefen verschwinden die Hohlräume in der Erdrinde mehr und mehr infolge des Druckes der überlagernden Massen; daher haben die meisten Brunnen von mehr als 600 m Tiefe unterhalb dieser Tiefe nur wenig Wasser ergeben. Jedoch gibt es in Australien zahlreiche fließende Brunnen, die ihr Wasser aus Tiefen von mehr als 900 bis 1200 m beziehen. Sogar in Tiefen bis 1800 m hat man porige Gesteine gefunden, die Grundwasser abgeben.

Nur ein Teil des Grundwassers kann durch Absenkung des Wasserspiegels herausgezogen werden (bei Meinzer als gravity ground water bezeichnet). Unter spezifischer Wasserlieferung (specific yield), einem sehr brauchbaren, in unserer Literatur bisher wenig geläufigen Begriff, versteht der Verfasser diejenige Wassermenge, die 100 Raumteile Boden abgeben können. Die spezifische Wasserlieferung und der spezifische Haftwassergehalt zusammen sind gleich der Porigkeit. Genau genommen, hängt die spezifische Wasserlieferung von der Zeit, die zum Ausfließen des Wassers zur Verfügung steht, von der Temperatur und der chemischen Beschaffenheit des Wassers und der Größe des wasserführenden Körpers ab. Man erhält, wenn man einen Brunnen plötzlich stark beansprucht, nicht die ganze der spezifischen Wasserlieferung entsprechende Wassermasse, da der gewinnbare Grundwasseranteil nicht so schnell den Boden verläßt. Die natürlichen Schwankungen des Grundwassers verlaufen dagegen meist so langsam, daß der Wasserabzug aus dem über dem Kapillarsaum liegenden Boden im wesentlichen vollendet wird.

Die Verfahren zur Bestimmung der spezifischen Wasserlieferung sind folgende:

1. Im Laboratorium werden genügend hohe Bodensäulen mit Wasser gesättigt. Dann läßt man unter möglichster Vermeidung von Verdunstung das der Schwere folgende Wasser ablaufen und bestimmt dieses und die zurückbleibende Wassermenge in Hundertteilen des Bodenraums.

2. Im Felde wird ein Bodenkörper mit Wasser durchtränkt, das man dann absickern läßt. Man bestimmt die danach im Boden zurückbleibende Wassermenge, die dem spezifischen Haftwassergehalt entspricht; ferner ermittelt man die Porigkeit und berechnet die spezifische Wasserlieferung aus dem Unterschied beider Zahlen.

3. Man sammelt Proben bestimmten Rauminhalts unmittelbar über dem Kapillarsaum, nachdem der Wasserspiegel gesunken ist, wie er es gewöhnlich im Sommer und Herbst tut. Der Wassergehalt solcher Bodenproben gibt ebenfalls Aufschluß über den spezifischen Haftwassergehalt (vergl. auch unter 2).

4. Man pumpt eine bestimmte Wassermenge heraus und mißt den dadurch von Grundwasser befreiten Bodenraum. Hierbei entstehen Ungenauigkeiten durch den Zugang von Sickerwasser und den Zufluß und anderweitigen Abfluß des Senkungsgebietes.

5. Man läßt bestimmte Wassermengen durch Gräben in den Untergrund versickern und bestimmt den dadurch bewirkten Grundwasseranstieg.

6. Man macht zur Berechnung der spezifischen Haftwassermenge im Laboratorium mittelbare Bestimmungen unter Anwendung der Zentrifugalkraft und verfährt weiterhin wie unter 2.

7. Aus mechanischen Bodenanalysen berechnet man den spezifischen Haftwassergehalt und bestimmt außerdem die Porigkeit.

Den Wassergehalt in der lufthaltigen Zone hat man in folgender, ebenso einfacher wie zweckmäßiger Weise untersucht. Man grub Löcher von der Erdoberfläche bis zum Grundwasserspiegel und entnahm dabei in Schichten von 30 cm mittels eines Metallzylinders Bodenproben von bestimmtem Rauminhalt, die sofort mitsamt der natürlichen Bodenfeuchtigkeit gewogen und dann getrocknet wurden. Die Tiefe des Wasserspiegels berechnete man im Mittel von rd. 28 000 Brunnen zu rd. 11 m. Im größten Teile des humiden Gebietes und in einem recht großen Teile des ariden Gebietes der Vereinigten Staaten ist die Dicke der lufthaltigen Zone weniger als 30 m; im Bergwerksgebiet von Tombstone, Arizona liegt der Grundwasserspiegel etwa 200 m tief; ausnahmsweise erreicht die Dicke der lufthaltigen Zone rd. 720 m.

Die lufthaltige Zone wird in 3 Unterzonen eingeteilt:

a) Die Bodenwasserzone, die nahe genug der Oberfläche liegt, um in merkbaren Mengen Wasser durch die Pflanzen oder durch Bodenverdunstung an die Luft abzugeben.
b) Die Zwischenzone.
c) Den Kapillarsaum.

In der Bodenwasserzone wachsen die Pflanzen. Die Wurzeln der gewöhnlichen Gräser und Getreidearten gehen meist nur etwa 1 m tief, wenn auch größere Tiefen, z. B. 2 m öfters beobachtet werden; Luzerne geht dem Kapillarsaum bis auf 6 bis 9 m Tiefe nach; ausdauernde Wüstenpflanzen gehen mit ihren Wurzeln bis 18 m tief hinab. Auch die Frage, inwieweit das Bodenwasser dem Pflanzenwachstum zugute kommt, wird behandelt.

Wo die „Zwischenzone" fehlt, rückt der Kapillarsaum in die Bodenwasserzone hinein. Die Wurzeln entziehen ihm dann Wasser, an dessen Stelle durch kapillare Tätigkeit von unten her Wasser aufrückt, das der Sättigungszone entzogen wird. So können Pflanzen ständig aus dieser versorgt und große Mengen Grundwasser in die Luft geschickt werden. Manche Pflanzenarten senden ihre Wurzeln gewöhnlich zum Kapillarsaum hinab und zehren so am Grundwasser wie Brunnen, Meinzer nennt sie daher „Phreatophyten"; diese sind in den ariden Gebieten auffälliger und deutlicher von anderen Pflanzen unterschieden als in den humiden.

Meinzer gibt dann eine eingehende Schilderung der einzelnen Gesteine Nordamerikas und der darin enthaltenen Hohlräume. Eine große Rolle als Wasserführer spielen Kieslager, Sande und Sandsteine; diese gehören zum Teil sehr alten Formationen an und führen wohl ihr Wasser nicht nur in Klüften, sondern vor allem in den Poren zwischen den Sandkörnern. Bei Quarziten dagegen sind die Poren verstopft und nur die Klüfte führen Wasser. Der glaziale Geschiebemergel enthält wasserführende Schichten nur in unregelmäßigen Nestern ganz wie bei uns.

Die Becken zwischen den Gebirgen in ariden Gebieten sind von eigentümlichen Ablagerungen erfüllt, die in der Hauptsache nur geringe Durchlässigkeit besitzen, aber von durchlässigen wasserführenden Adern durchzogen werden. Die Kalksteine sind teils sehr ergiebige, teils sehr schlechte Wasserlieferer, je nach dem Grade der Auswaschung. In der Regel ist die Grenze zwischen der lufthaltigen Zone und der Sättigungszone bei Kalksteinen ebenso wohl ausgeprägt wie bei anderen Gesteinen. Torf und Kohle enthalten in der Regel, wenn sie unter dem Wasserspiegel liegen, einiges gewinnbare Grundwasser. Basalt spielt als Wasserlieferer eine bedeutende Rolle in den Vereinigten Staaten, während die an Silizium reicheren vulkanischen Gesteine und die Granite ungünstiger sind.

Im folgenden bespricht der Verfasser noch die Bedeutung von Schichtenlagerung, Verwerfungen usw. für die Wasserführung, und gibt einen Abriß der historischen Geologie seines Landes unter steter Berücksichtigung des Wassers. W. Koehne.

Das Nidderkraftwerk bei Lißberg in Oberhessen.

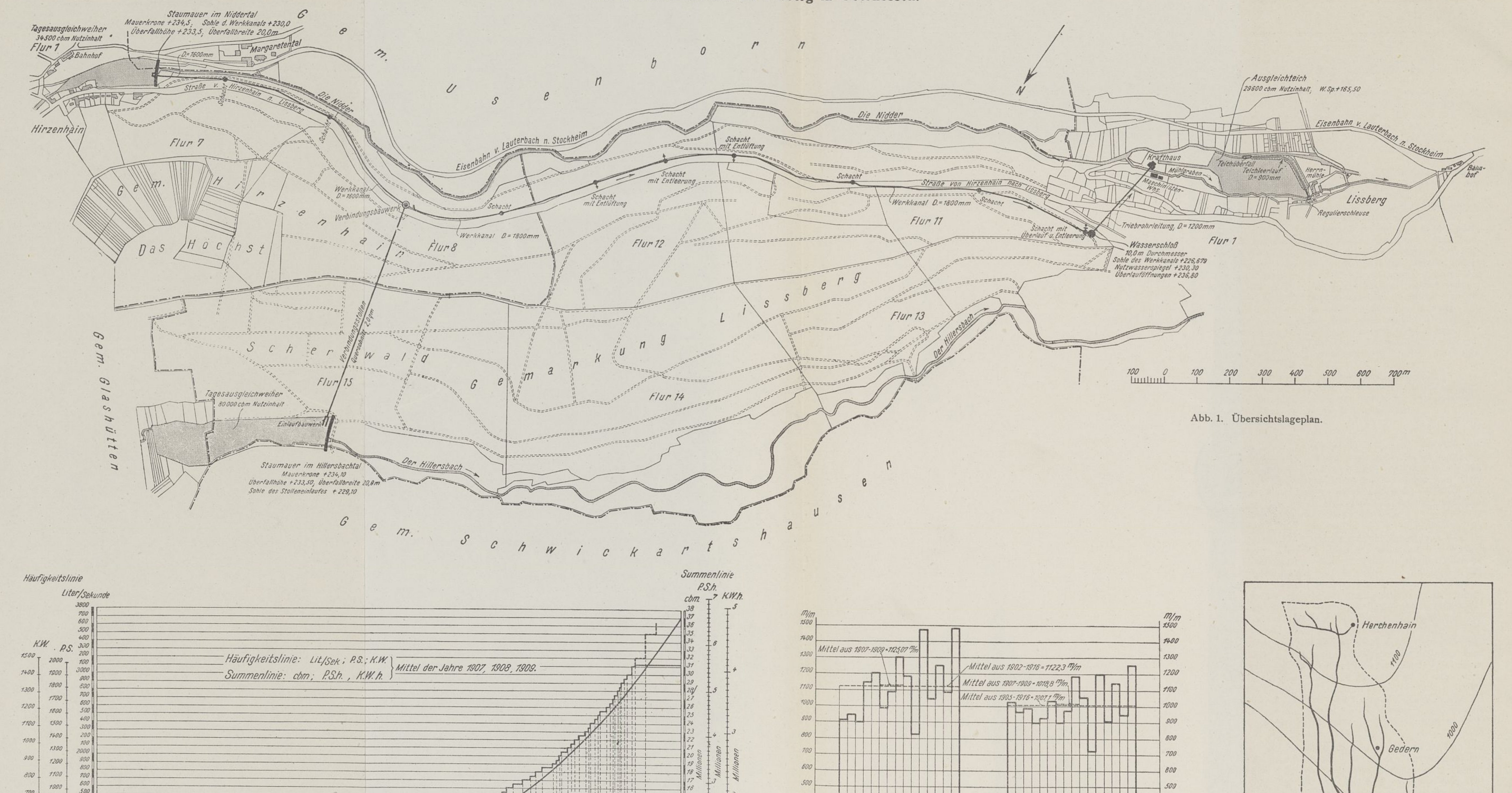


Abb. 1. Übersichtslageplan.

Abb. 2. Jahresabfluß. Mittel der Jahre 1907—1909

Abb. 3. Jahresniederschlagshöhen.

Abb. 4. Niederschlagshöhen des Einzugsgebietes des Nidderkraftwerks. Durchschnitt der Jahre 1905—1910.

Verlag von Guido Hackebeil Akt.-Ges., Berlin S 14.